

Intensificación de los sistemas pastoriles de cría bovina del Chaco semiárido argentino

*Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,
Área Producción Animal*

María Virginia Viale

Ingeniera Agrónoma – Universidad Nacional de Córdoba – 2012

Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Facultad de Ciencias Veterinarias
Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CONSEJERO

Director de tesis

José Andrés Nasca

Ingeniero Zootecnista (Universidad Nacional de Tucumán)

Dr. (Universidad de Buenos Aires)

Co-director de tesis

Cristian Rodolfo Feldkamp

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Entre Ríos)

Dr. (Universidad Humboldt de Berlín)

JURADO DE TESIS

Dr. Agustín López

Dra. Marcela Martínez

Dr. Gonzalo Irisarri

Fecha de defensa de la tesis: 10 de Junio, 2021

Agradecimientos

A mi familia, inmensa red que me sostiene y acompaña en cada etapa importante de mi vida... y a todas las personas, que a lo largo de este proceso me ayudaron en mayor o menor medida, a ampliar mi visión, a hacerme preguntas, a dialogar en profundidad con mi tema de tesis, a tomar nuevos rumbos...

A todas y a cada una de las personas que aquí menciono, mi más sincero agradecimiento, de corazón.

INDICE GENERAL

| | |
|------------------------|----|
| DECLARACIÓN | IV |
| INDICE DE CUADROS..... | V |
| INDICE DE FIGURAS..... | VI |
| RESUMEN..... | X |
| ABSTRACT..... | XI |

Capítulo 1: Introducción general

| | |
|---|----|
| 1.1. Introducción..... | 1 |
| 1.1.1. Descripción de los sistemas ganaderos en el Chaco semiárido..... | 2 |
| 1.1.2. Proceso de intensificación en el Chaco semiárido argentino..... | 6 |
| 1.1.3. Impacto ambiental de la intensificación ganadera..... | 7 |
| 1.2. Complejidad de los sistemas agropecuarios y dinámica de sistemas | 9 |
| 1.3. Objetivos e hipótesis de la tesis | 9 |
| 1.4. Organización de la tesis y objetivos específicos..... | 11 |

Capítulo 2: Impacto de la intensificación ganadera sobre la eficiencia de los sistemas de cría del chaco semiárido

| | |
|---|----|
| 2.1 Introducción | 14 |
| 2.1.1 Producción de carne | 14 |
| 2.1.2 Resultado económico | 15 |
| 2.1.3 Impacto ambiental de la intensificación ganadera | 16 |
| 2.2 Hipótesis | 17 |
| 2.3 Objetivos | 18 |
| 2.4 Materiales y Métodos..... | 18 |
| 2.4.1 Descripción del área de estudio | 18 |
| 2.4.2 Indicadores utilizados | 20 |
| 2.4.3 Características generales del modelo de simulación utilizado..... | 22 |
| 2.4.4 Características de los sistemas de producción simulados | 24 |
| 2.4.5 Diseño experimental | 27 |
| 2.5. Resultados y Discusión | 28 |
| 2.5.1. Producción de carne | 28 |
| 2.5.2. Resultado económico | 33 |
| 2.5.3. Impacto ambiental | 36 |
| 2.6. Conclusiones | 41 |

Capítulo 3: Impacto de la intensificación ganadera sobre la estabilidad de los sistemas de cría del Chaco semiárido

| | |
|---|----|
| 3.1. Introducción | 43 |
| 3.1.1. Variabilidad en las precipitaciones..... | 43 |
| 3.1.2. Variabilidad en la producción de las pasturas..... | 46 |
| 3.1.3. Variabilidad en la producción de carne..... | 46 |
| 3.1.4. Impacto del silaje en la estabilidad del sistema..... | 47 |
| 3.2. Hipótesis | 48 |
| 3.3. Objetivos..... | 48 |
| 3.4. Materiales y Métodos..... | 49 |
| 3.4.1 Diseño experimental | 50 |
| 3.5. Resultados y Discusión..... | 51 |
| 3.5.1. Variabilidad en las precipitaciones y oferta de forraje..... | 51 |
| 3.5.2. Variabilidad del forraje y carga animal..... | 53 |
| 3.5.2.1. Incidencia de la variabilidad del forraje sobre la carga animal de los siste- mas | 53 |
| 3.5.2.2. Incidencia de la carga animal sobre la producción de forraje..... | 55 |
| 3.5.3. Variabilidad en la carga animal y producción de carne..... | 59 |
| 3.6. Conclusiones..... | 60 |

Capítulo 4: Discusión general y conclusiones

| | |
|--|----|
| 4.1. Discusión general..... | 63 |
| 4.2. Aportes originales derivados de esta tesis | 68 |
| 4.3. Nuevos interrogantes que surgen a partir de la tesis..... | 70 |

| | |
|--------------------------|-----------|
| BIBLIOGRAFÍA..... | 72 |
|--------------------------|-----------|

| | |
|---|-----------|
| Anexo I Calibración y evaluación del modelo DSSAT..... | 93 |
|---|-----------|

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.

Índice de Cuadros

| | |
|--|----|
| Cuadro 2.1: Indicadores de eficiencia utilizados para evaluar los sistemas de cría bovina del Chaco semiárido..... | 21 |
| Cuadro 2.2: Tratamientos y principales reglas de manejo que definen los distintos niveles de intensificación de los sistemas de cría simulados donde T1, T2 y T3 corresponden a sistemas exclusivamente con alimentación de base pastoril, y T4, T5, T6, T7 a sistemas pastoriles con inclusión de silaje en la dieta. | 26 |
| Cuadro 2.3: Producción de carne para los distintos escenarios de intensificación (T1-T7) en términos de producción de carne por hectárea ($\text{Kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$). | 28 |
| Cuadro 2.4: Principales respuestas observadas en los sistemas de cría simulados para las localidades de Leales, Quimilí e Isca Yacu frente a intensidades crecientes de intensificación (carga animal, incorporación de silaje de maíz, frecuencia de renovación de pasturas). | 32 |
| Cuadro 2.5: Resultados obtenidos de Margen bruto ($\text{\$.ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) para los distintos escenarios de intensificación (T1-T7) en las localidades estudiadas Leales, Quimilí e Isca yacu. | 33 |
| Cuadro 2.6: Resultados obtenidos en relación al Costo directo total ($\text{\$.ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) para los distintos escenarios de intensificación y localidades estudiadas. | 34 |
| Cuadro 2.7: Resultados obtenidos de emisiones por hectárea ($\text{Kg CO}_2\text{eq} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) para los distintos escenarios de intensificación (T1-T7) y localidades estudiadas. | 36 |
| Cuadro 3.1: Registros históricos de precipitación ($\text{mm} \cdot \text{año}^{-1}$) y su coeficiente de variación (CV) de 45 localidades del Chaco semiárido, correspondientes a las provincias de Tucumán, Santiago del Estero, Catamarca, Salta, Formosa, Chaco y norte de Córdoba. Fuente: Instituto de Clima y agua – INTA Castelar; Servicio Meteorológico Nacional; Bolsa de Cereales de Córdoba; Portal de datos EEA-INTA Santiago del Estero (http://santiago.inta.gov.ar/meteo/)..... | 44 |
| Cuadro 3.2: Consumo de silaje (días de utilización) y coeficiente de variación (%) para los sistemas de cría bovina simulados en las localidades de Isca yacu y Leales. Los valores, tanto de la carga animal ($\text{Kg}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) cómo de los días de utilización de silaje, corresponden al promedio (media \pm desvío estándar) de 50 años de simulación..... | 59 |

Índice de figuras

Figura 1.1: Mapa representativo de las distintas ecorregiones del país según Cabrera (1976) y las subregiones que conforman la región chaqueña, dentro de las cuales se destaca el Chaco semiárido argentino4

Figura 1.2: Precipitación media anual en la región chaqueña (Fernández et al., 2020)4

Figura 1.3: a) Sistemas de producción bovina en la región chaqueña y su orientación productiva: cría, ciclo completo, engorde; b) orientación productiva y tipo de paisaje predominante en función de la superficie de bosque nativo presente y el principal recurso forrajero utilizado (agrícola, mixto, bosque) (Fernandez et al., 2020).....4

Figura 1.4: a) Densidad de ganado en el Chaco Seco Argentino para el año 2016 (cabeza.km²); b) Densidad de ganado y distribución en la región chaqueña: baja densidad (14% del total de cabezas de las regiones en un 50% del área), densidad media (36% del total de cabezas de la región en un 25% del área) y alta densidad (60% del total de cabezas de la región en un 25% del área); c). Curva de Lorenz de ganado densidad en la región de estudio (es decir, densidad acumulada de ganado clasificada frente a una curva de área).....4

Figura 1.5: Mapa de ordenamiento territorial de la República según Ley Nacional 26.331 de Presupuestos mínimos de protección ambiental de los bosques nativos. Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo de la Nación – Sistema Integrado de Información ambiental. (<https://sina.ambiente.gob.ar/geovisor.php#>).....5

Figura 2.1: Distribución espacial de variables climáticas a resolución espacial de 1km. Mapas elaborados a partir de información disponible en el laboratorio de SIG y Teledetección de INTA (Bianchi *et al.*, 2002).....19

Figura 2.2. Mapa de la región del Chaco semiárido argentino y las localidades consideradas en el presente estudio: 1. Leales (Tucumán); 2. Isca yacu (Santiago del Estero); 3. Quimili (Santiago del Estero). En la tabla se observa la distribución mensual de la precipitación (mm) junto con la precipitación media anual para las localidades de referencia y el coeficiente de variación inter-anual (%) correspondiente.20

Figura 2.3. Representación simplificada del modelo del sistema de producción (Nasca *et al.*, 2015). Los límites del sistema se encuentran representados por las líneas externas punteadas. Al sistema ingresa información (flechas grises), materia/energía (flechas negras) y eventos (flechas punteadas) que interactúan entre los diferentes componentes del modelo. Como salida principal del sistema se considera el flujo de materia/energía. Diferentes submodelos estructuran el modelo principal: a) Submodelo de producción y b) Submodelo de manejo en interacción con el modelo energético y el económico. Las cajas dentro del modelo de producción, simbolizan la estructura matricial del rodeo, la pastura y el suelo. La posibilidad de trabajar con matrices permite representar objetos con atributos particulares, agrupados en varias categorías (e.g., categorías de animales en un rodeo, grupo de parcelas de pastoreo por categorías de animales). De este modo,

cada componente (e.g., animal y parcela) retiene su individualidad a través del modelo completo. El submodelo de manejo, representa el conjunto de estrategias y reglas de decisión del modelo.....23

Figura 2.4. Diagrama de modelación de lenguaje unificado representando las reglas de decisión para la estrategia de destete anticipado en sistemas pastoriles puros y pastoriles con incorporación de silaje 27

Figura 2.5: Consumo de silaje ($\text{KgMS.cab}^{-1}.\text{año}^{-1}$) y días de utilización de silaje (días.año^{-1}) para los sistemas pastoriles T4, T5, T6 y T7 en las localidades estudiadas de Leales, Quimilí e Isca Yacu 39

Figura 2.6: Relación entre consumo de materia seca ($\text{KgMS.cab}^{-1}.\text{año}^{-1}$) y porcentaje de preñez considerando todos los sistemas productivos (T1-T7) y las tres localidades evaluadas (Leales, Quimilí, Isca Yacu). 30

Figura 2.7: Relación entre los kilogramos destetados por hectárea (Kg ha.año^{-1}) y los kilogramos destetados por vientre entorado (KgVE.año^{-1}) a medida que se incrementa la intensificación de los sistemas de cría..... 31

Figura 2.8: Representación porcentual del silaje en los costos directos de los sistemas de cría correspondientes a los tratamientos T4, T5, T6 y T7. Las barras por encima de las columnas representan el desvío estándar de cada tratamiento. 34

Figura 2.9: a) Representación de la suplementación en los costos (%) para cada uno de los escenarios de intensificación y localidades estudiadas; b) Relación entre el nivel de carga animal ($\text{kg.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$) y la utilización ($\text{Kg.cab}^{-1}.\text{año}^{-1}$) de la suplementación destinada a la recría. 35

Figura 2.10: Composición de las emisiones en términos porcentuales (%) para cada una de las localidades y tratamientos evaluados (T1-T7). 37

Figura 2.11: Relación entre el margen bruto ($\text{\$.ha.año}^{-1}$) y la producción de carne (kg.ha.año^{-1}) (MB:PC) para los distintos escenarios de intensificación evaluados (T1-T7) considerando las tres localidades de estudio Leales, Quimilí e Isca yacu. Las barras por encima de las columnas representan el desvío estándar de cada tratamiento. 38

Figura 2.12: a) Incrementos relativos en función del nivel de intensificación precedente para a) Producción de carne (Kg.ha.año^{-1}); b) Margen bruto ($\text{\$.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$); c) Kilogramos destetados por hectárea en relación al nivel de intensificación precedente para las distintas localidades estudiadas; d) Kilogramos de descarte relativos al nivel de intensificación precedente ($\text{kg.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$) para las tres localidades de estudio y los distintos escenarios de intensificación (T1-T7).38

Figura 2.13: a) Costo directo relativo ($\text{\$.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$) y b) Ingreso bruto relativo al nivel de intensificación precedente para los distintos tratamientos (T1-T7) y localidades estudiadas...39

- Figura 2.14:** Relación entre producción de carne ($\text{Kg carne}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) e Impacto ambiental evaluado en términos de emisión de gases por unidad de superficie ($\text{Kg CO}_2\text{eq}\cdot\text{ha}^{-1}$). 40
- Figura 3.1:** Relación entre la precipitación media anual y su coeficiente de variación (CV) expresado en porcentaje para distintas localidades del Chaco semiárido argentino..... 45
- Figura 3.2:** Listado de las localidades consideradas en el estudio, con su respectivo valor de precipitación media histórica ($\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$) y coeficiente de variación expresado en porcentaje. Ubicación geográfica de los 12 sitios de estudio considerados. 50
- Figura 3.3:** Relación entre la precipitación ($\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$) y el coeficiente de variación (CV%) del forraje y entre el coeficiente de variación (CV%) del forraje y las precipitaciones para las distintas localidades y sistemas de cría analizados de la región del Chaco semiárido argentino..51
- Figura 3.4:** Relación entre la precipitación acumulada entre el mes de Diciembre y Marzo ($\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$) y la producción de forraje ($\text{KgMS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) para los distintos sistemas pastoriles de cría de las localidades de Isca yacu y Leales. 53
- Figura 3.5:** Relación entre la variabilidad interanual del forraje (CV) y el coeficiente de variación de la carga para los distintos sistemas pastoriles (SP) de cría utilizados en este estudio. Los puntos negros representan los sistemas simulados, los blancos sistemas reales de producción. La línea completa representa el ajuste del modelo de regresión lineal (valor $p < 0.05$)..... 54
- Figura 3.6:** Evolución de la condición corporal en relación a las precipitaciones anuales en la localidad de Isca Yacu (precipitación media anual $577 \text{ mm}\cdot\text{año}^{-1}$) bajo distintos niveles de intensificación (sistema pastoril: SP 1= carga $189 \text{ Kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$; SP 2= carga $257 \text{ Kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$; sistema intensivo: SI $733 \text{ Kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$). El valor de condición corporal corresponde al valor promedio anual en la escala 1-9. El valor de precipitación (pp) corresponde al valor anual expresado en milímetros..... 55
- Figura 3.7:** Relación entre el nivel de intensificación de sistemas pastoriles (Carga animal - $\text{KgPV}\cdot\text{ha}^{-1}$), el forraje disponible ($\text{KgMs}\cdot\text{ha}^{-1}$) y su variabilidad (CV) para las localidades de Leales, Santiago del estero, Palomar y Recreo. Los valores expresados son resultado promedio de 50 años de simulación para cada uno de los sistemas y localidades evaluados..... 56
- Figura 3.8:** Impacto de la variabilidad en las precipitaciones (pp) sobre la producción de forraje para la Localidad de Isca yacu. Los resultados corresponden a sistemas de cría simulados frente a distintos niveles de carga animal: a) $189 \text{ KgPV}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, b) $733 \text{ Kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, c) $1790 \text{ Kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$. En el gráfico puede observarse además de la dinámica de las precipitaciones ($\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$) y el forraje disponible ($\text{kgMs}\cdot\text{ha}\cdot\text{año}^{-1}$), la fluctuación en el consumo de silaje expresado en $\text{días}\cdot\text{año}^{-1}$ 57
- Figura 3.9:** Relación entre la variación inter anual en la precipitación anual (CV) y la variación inter anual en la carga animal (CV). Se diferencian dos tipos de sistemas bovinos de cría: a) pastoriles, b) intensificados. El panel interno muestra los valores medios para el CV de la carga

animal según los dos tipos de sistemas. Las barras indican el D.E. Los *;** indican diferencias significativas (Valor $p < 0,05$). 58

Figura 3.10: **a)** Relación entre la carga animal ($\text{kg ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) y la variación inter anual en la producción de carne (CV). Se describen dos tipos de sistemas bovinos de cría: pastoriles e intensificados. Los mismos se diferencian significativamente en el CV de la producción de carne (Valor $p < 0,05$). **b)** Relación entre el coeficiente interanual de la carga animal ($\text{kg ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) y la variación inter anual en la producción de carne de sistemas pastoriles puros (CV). 60

Figura 4.1: Diagrama de causalidad de las principales variables incorporadas en el estudio. El impacto positivo (+) o negativo (-) de una variable sobre otra se denota en la punta de las flechas (e.g. producción peso vivo por hectárea \rightarrow (+) producción de carne). 64

Figura 4.2: Relación entre la producción de carne ($\text{Kg carne} \cdot \text{ha} \cdot \text{año}^{-1}$) y estabilidad (CV%) para sistemas de cría bovina: **a)** Sistemas pastoriles y **b)** Sistemas intensificados. Los círculos blancos expresan la relación entre la variabilidad interanual de la producción de carne medida en términos de coeficiente de variación interanual (CV) y la producción de carne para los distintos sistemas analizados ($\text{Kg carne} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$): En color negro se observan los puntos correspondientes a las localidades con precipitación media anual superior a 800 mm; en gris los puntos correspondientes a la localidad con precipitación media anual cercana a 400 mm 67

Figura 4.3: Frontera de riesgo eficiente para la producción de carne. Los valores fueron calculados a partir de los 50 años de corrida del modelo. La línea dentro del gráfico separa entre sistemas pastoriles puros (SP) e intensificados (SI). 68

Resumen

Los sistemas de cría bovina del Chaco semiárido argentino se encuentran en un proceso de intensificación complejo y sin precedentes, movilizados por la necesidad de mejorar la eficiencia de los sistemas y al mismo tiempo, favorecer la estabilidad de los mismos mediante la incorporación de estrategias tales como los forrajes conservados (e.g. silaje de maíz planta entera) junto al dilema de reducir la presión que genera la expansión de la frontera agropecuaria sobre las áreas de bosques y pastizales naturales y disminuir la emisión de gases de efecto invernadero. En esta tesis se evaluó el comportamiento de sistemas de cría bovina frente a la intensificación ganadera (Eficiencia, Exp. 1) y (Estabilidad, Exp. 2). En el primer experimento, fueron simulados distintos niveles de intensificación para tres localidades en función de i) carga animal objetivo, ii) incorporación de silaje de maíz planta entera, iii) renovación de pasturas. El análisis se realizó en términos de producción de carne, margen bruto y emisión de gases de efecto invernadero por unidad de superficie. Los resultados sugieren que niveles de intensificación crecientes mejoraron la producción de carne por unidad de superficie y el resultado económico de los sistemas de cría, aunque en este último caso por encima de 1000 Kg de carga animal los incrementos fueron decrecientes. Sin embargo, la emisión de gases de efecto invernadero ($\text{CO}_2\text{eq.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$) presentó una asociación positiva con la intensificación por efecto de la carga animal y la mayor utilización de insumos externos. Si bien estos resultados tuvieron una tendencia similar en las tres localidades estudiadas, la localidad con menor precipitación media anual (mm.año^{-1}) expresó mayor requerimiento de forrajes conservados y suplementación, asociándose dicha variable a un mayor consumo de energía fósil y afectando de manera más acentuada el margen bruto del sistema en relación a las otras dos localidades. En el segundo experimento, se evaluó el impacto de la intensificación ganadera sobre la estabilidad productiva de los sistemas de cría, relacionando i) precipitaciones, ii) producción de forraje, iii) carga animal y iv) producción de carne por unidad de superficie. En este capítulo, se evaluaron tanto sistemas simulados como sistemas reales de producción. Se realizaron comparaciones a) entre sistemas pastoriles puros, y b) entre sistemas pastoriles puros e intensificados. En general, la precipitación media anual (mm.año^{-1}) y la variabilidad interanual de las lluvias (CV%) estuvieron relacionadas con la variabilidad en la producción de forraje. A su vez, incrementos en la variabilidad interanual del forraje (CV%), generaron mayor variabilidad interanual de la carga animal de los sistemas de cría pastoriles puros expresando una relación inversa entre la carga animal y la estabilidad productiva ($\text{kg carne.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$). Dentro de los sistemas pastoriles puros, aquellos de cargas bajas a moderadas demostraron ser más estables en el tiempo. Por otro lado, al comparar sistemas pastoriles puros con sistemas intensificados, estos últimos fueron más estables, demostrando el beneficio del silaje de maíz como herramienta para reducir variaciones en el consumo de forraje, la carga animal y la producción de carne. Finalmente, al analizar en forma conjunta las relaciones existentes entre producción de carne y estabilidad productiva de los sistemas de cría estudiados, se observó que mayores niveles de producción de carne estuvieron asociados a una mayor variabilidad de los sistemas, tanto pastoriles puros como intensificados. Sin embargo, los sistemas intensificados alcanzaron mayores niveles de producción y demostraron a su vez, un comportamiento más estable en el tiempo.

Palabras clave: *intensificación sistemas de cría, eficiencia, estabilidad, dinámica de sistemas.*

Abstract

Cow-calf systems in the semiarid Chaco region of Argentina are going through a complex process of intensification promoted not only by the necessity of improving the efficiency of the systems but also to mitigate the greenhouse emissions and reducing the land transformation of forests and natural grasslands to cropping area. Due to the environmental characteristics that semiarid regions present, particularly in relation with variability in precipitation, the need of new strategies such as preserved forages (e.g. maize silage) are an opportunity to improve the stability of these systems. Two experiments were performed to evaluate the behavior of cow-calf systems intensification, the first one in relation to its efficiency (Exp.1) and the second one to its stability (Exp.2). For Exp.1 we simulated different levels of intensification for three locations according to i) target stocking rate, ii) maize silage use and iii) pasture renovation strategies. We analyzed data in terms of meat production, gross margin and greenhouse emissions per unit area. Results suggest that increasing intensification levels improved efficiency in terms of productivity and economic variables of cow-calf systems. Although beyond 1000 kg of stocking rate the gross margin increased but less than proportional. However, the increase of stocking rate and the external inputs, impacted positively on greenhouse gases ($\text{kg CO}_2\text{eq.ha}^{-1}\text{.year}^{-1}$) emissions. Although these results were similar for three locations, the one with the lowest mean precipitation (mm.year^{-1}) showed the highest increase in preserved forages and supplements use, affecting the gross margin of the system as there was an increase in fossil energy requirements as well. For Exp. 2, we evaluated the impact of cow-calf system intensification on production stability related to i) precipitation, ii) forage production, iii) stocking rate and iv) meat production per unit area. In this case, we worked with both simulated and real systems compared between a) different grazing systems and b) feed grazing systems vs ones that added supplements (intensive) systems. We found that forage production was affected by the mean annual precipitation and its interannual variability. Also, the interannual variability of forage production (CV%) increased the interannual stocking rate variability in the grazing systems showing a negative correlation between the stocking rate and the productive stability ($\text{kg meat.ha}^{-1}\text{.year}^{-1}$). Likewise, grazing systems with low to moderate stocking rates presented a stable behavior ($\text{kg meat.ha}^{-1}\text{.year}^{-1}$) time in comparison with high stocking rates grazing systems. On the other hand, intensive cow-calf systems were more stable than the grazing systems, showing the benefits of maize silage used as a tool to reduce variations in the forage intake, the stocking rate and meat production. Finally, a higher meat production was associated with a lower stability of the cow-calf system in both grazing and intensive systems. However intensive systems achieved higher production levels as well as a more stable behavior.

Keywords: *cow-calf intensification, efficiency, stability, system thinking.*

Capítulo 1:
Introducción general

1.1. Introducción General

En los últimos años la intensificación de los sistemas ganaderos ha sido propuesta como una estrategia para mejorar la eficiencia de los sistemas y al mismo tiempo, una vía para mitigar la emisión de gases de efecto invernadero y reducir la presión que genera la expansión de la frontera agropecuaria sobre las áreas de bosques y pastizales naturales (Cardoso *et al.*, 2016). Sin embargo, lejos del consenso general, la intensificación de los sistemas agropecuarios es un hecho que se ha convertido en foco de debate a escala local e internacional, tanto en el ámbito político, académico, como de la comunidad en general en torno a los modelos de producción agropecuaria y su vínculo con los diferentes usos del territorio. Por un lado, están quienes sostienen que es posible hallar un balance entre los valores e intereses del sector agroindustrial (Lattera *et al.*, 2011; Barretto *et al.*, 2013) y la conservación de los recursos naturales, para lo cual proponen la idea de 'integración' entre producción y conservación (land sharing), apoyando sistemas agropecuarios que permitan mantener la biodiversidad a nivel del paisaje (Philpott y Dietsch 2003; Chazdon *et al.* 2009; Clough *et al.*, 2011). Algunos ejemplos de ello, son los sistemas silvopastoriles y el manejo de bosque con ganadería integrada (MBGI). Sin embargo, algunos autores plantean que, el modelo agroindustrial bajo el paradigma de "separación" de la tierra (land sparing) podría jugar un rol importante en el balance entre conservación de los recursos naturales y producción, destinando superficie con fines exclusivamente productivos, y por otro lado, superficie destinada a la conservación de los recursos naturales. Esta forma, apoya la intensificación de los sistemas agropecuarios como una estrategia para mantener o incrementar la productividad por área, y al mismo tiempo, liberar tierras para la conservación de la biodiversidad a nivel del paisaje (Green *et al.* 2005a; Ewers *et al.* 2009; Phalan *et al.* 2011 b). La búsqueda de un balance entre la producción de alimentos y la conservación de la naturaleza sintetiza muchos de los conflictos entre los diferentes usos del territorio. En el Chaco Semiárido, estos conflictos se reflejan en procesos de cambio acelerados. Un uso más eficiente de la tierra se relaciona a optimizar distintos beneficios de los ecosistemas, incluyendo una mejor conservación de la naturaleza asociada a mayor producción de alimentos, y una reducción de potenciales conflictos entre los distintos actores sociales y grupos étnicos (Grau *et al.*, 2011).

El presente trabajo, aborda la intensificación de los sistemas ganaderos pastoriles desde el paradigma de "separación de tierras", a escala de sistema agropecuario (empresa mediana-grande), principalmente desde la dimensión productiva del proceso (eficiencia, estabilidad) y ambiental (emisión de gases de efecto invernadero). En términos generales, la intensificación se encuentra ligada a la adopción de tecnologías que permitan incrementar la eficiencia en el uso de la tierra, con aumentos en la cantidad de productos obtenidos por unidad superficie en una escala temporal dada (Green *et*

al., 2005; Ewers *et al.*, 2009; Phalan *et al.*, 2011). Particularmente en los sistemas ganaderos pastoriles, la intensificación se caracteriza por un incremento en la carga animal (cabezas por hectárea), en la cantidad de alimentos producidos en forma de forrajes (White *et al.*, 2010) y en la utilización de insumos externos (Viglizzo *et al.*, 2001). Estas estrategias en interacción con los diferentes componentes del sistema, determinan la estructura y por tanto el comportamiento del sistema (Morecroft, 2007; Sterman, 2000). El comportamiento de un sistema puede describirse mediante propiedades emergentes como la eficiencia y la estabilidad (Feldkamp, 2004; Viglizzo y Roberto, 1998), de carácter dinámico y multidimensional (Conway, 1987).

El concepto de eficiencia es posible definirlo en términos de la relación objetivo/factor limitante. En la dimensión productiva, un indicador de eficiencia ampliamente utilizado en los sistemas ganaderos es la producción de carne por unidad de superficie (Nasca *et al.*, 2015; Fernández Rosso *et al.*, 2018; O'Reagain *et al.*, 2009; White *et al.*, 2010; Capper *et al.*, 2011). Por otro lado, la expresión del margen bruto como resultado económico por unidad de un recurso por el cual compiten dos o más actividades (superficie de tierra, por ejemplo), es ampliamente utilizado para el análisis individual de la empresa ganadera, pero aún más con el objetivo de realizar estudios comparativos entre alternativas de un mismo establecimiento y/o para evaluar el desempeño entre explotaciones de características similares (Alvarado *et al.*, 2011). La estabilidad, es la constancia de la productividad del sistema en el tiempo frente a oscilaciones de clima, precio, mercado (Conway, 1987) y es posible evaluarlo mediante el desvío estándar y el coeficiente de variación. La región de estudio dónde se sitúa este trabajo corresponde al Chaco semiárido argentino (Figura 1.1), ubicado en el noroeste del país, el cual merece considerable atención debido a su cercano vínculo con la producción agropecuaria, y especialmente con la intensificación de la ganadería de cría bovina. A continuación, se describe brevemente el contexto en el cual se enmarca este trabajo de tesis.

1.1.1. Descripción de los sistemas ganaderos en el Chaco semiárido

La producción de carne bovina es una actividad económica de gran importancia en el Chaco semiárido argentino, donde los sistemas de cría bovina representan una de las actividades de mayor predominancia de la región. Un estudio reciente realizado por Fernandez *et al.* (2020) para la región chaqueña (Figura 1.1), permite observar que la distribución de los animales tiene mayor preponderancia hacia el sector Este de la región (Figura 1.4) coincidiendo con la zona de mayor precipitación media anual (Figura 1.2). En el mismo estudio, Fernandez *et al.* (2020) mencionan que del total del rodeo existente en la región chaqueña al año 2016 (5.494.937 cabezas de ganado), sólo un 14% (770.000 cabezas de ganado) se distribuyó en el 50% de la superficie, correspondiendo con la menor

densidad ganadera de la región (cabezas.km²), mientras que en la mitad de la superficie restante, el 25% es ocupado por una densidad ganadera intermedia (36% del rodeo total), y el otro 25%, con una densidad ganadera alta (aproximadamente 2.747.000 cabezas de ganado). Particularmente, los sistemas de cría de la región chaqueña se encuentran en paisajes compuestos entre un 15 y 85% por bosque nativo (Fernandez *et al.*, 2020), acompañados de un fuerte componente pastoril basado en especies megatérmicas (C4) (Nasca *et al.*, 2015), con potencial para incrementar la producción de forraje durante el verano, mientras que para las especies C3 resulta un ambiente limitante (Davies y McNaughton 1980; Johnston 1996; Crush y Rowarth 2007). Los pastizales naturales de la región se caracterizan por una baja producción forrajera representando una de las principales condicionantes para la producción ganadera, en gran parte, debido a su estado de degradación, y por otro lado, por la composición botánica de las praderas. De allí que la implantación de pasturas tropicales es una característica distintiva de los sistemas de cría en el Chaco semiárido (Nasca *et al.*, 2015). Las áreas agrícolas cultivadas de la región, se concentran en aquellas zonas donde las condiciones de clima y suelos son más favorables, constituyendo una serie de núcleos productivos distribuidos en la región (Adámoli *et al.*, 2011, Volante, 2012). Para el caso de sistemas bovinos de cría presentes en la región del Chaco semiárido que cuentan con más de 500 cabezas de ganado, la Dirección de ganadería bovina – Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca informó en un estudio reciente (<https://datos.agroindustria.gob.ar/dataset/bovinos-limitantes-tecnologicas-de-la-cria-bovina>) que algunas de las limitantes tecnológicas que enfrentan dichos sistemas se encuentran relacionadas a la falta de planificación de la empresa agropecuaria, un inadecuado manejo forrajero, bajo poder de negociación de venta, y la dificultad para adecuarse a la ley de bosques (Ley 26.331 - Presupuestos mínimos de protección ambiental de los bosques nativos. Figura 1.5).

Figura 1.1

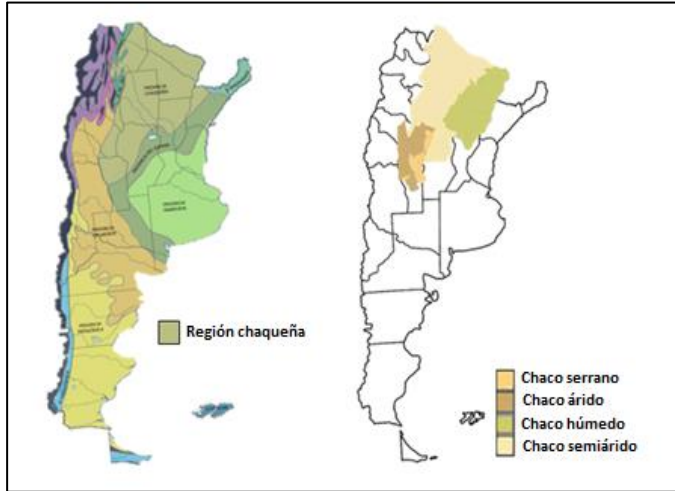


Figura 1.2

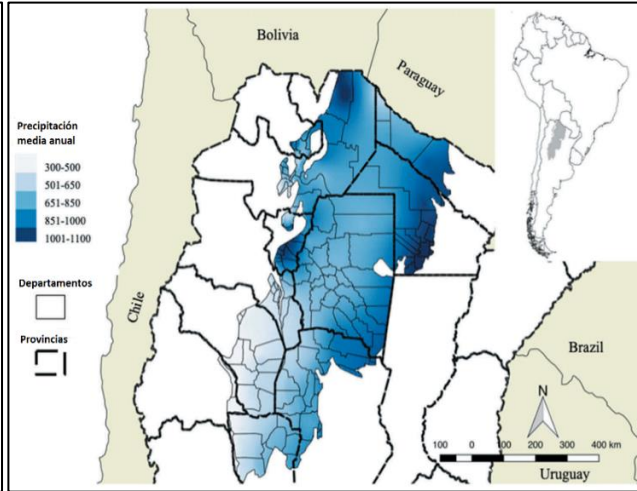


Figura 1.1: Mapa representativo de las distintas ecorregiones del país según Cabrera (1976) y las subregiones que conforman la región chaqueña, dentro de las cuales se destaca el Chaco semiárido argentino. **Figura 1.2:** Precipitación media anual en la región chaqueña (Fernández et al., 2020). **Figura 1.3:** a) Sistemas de producción bovina en la región chaqueña y su orientación productiva: cría, ciclo completo, engorde; b) orientación productiva y tipo de paisaje predominante en función de la superficie de bosque nativo presente y el principal recurso forrajero utilizado (agrícola, mixto, bosque) (Fernandez et al., 2020). **Figura 1.4:** a) Densidad de ganado en el Chaco Seco Argentino para el año 2016 (cabeza.km²); b) Densidad de ganado y distribución en la región chaqueña: baja densidad (14% del total de cabezas de las regiones en un 50% del área), densidad media (36% del total de cabezas de la región en un 25% del área) y alta densidad (60% del total de cabezas de la región en un 25% del área); c). Curva de Lorenz de ganado densidad en la región de estudio (es decir, densidad acumulada de ganado clasificada frente a una curva de área)

1

Figura 1.3

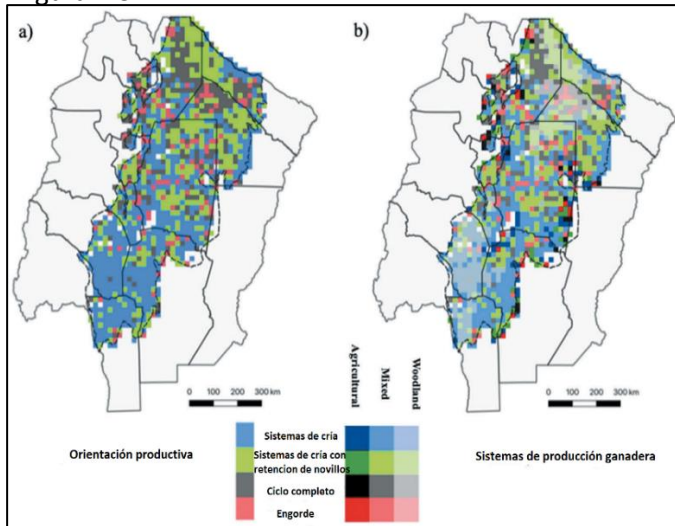
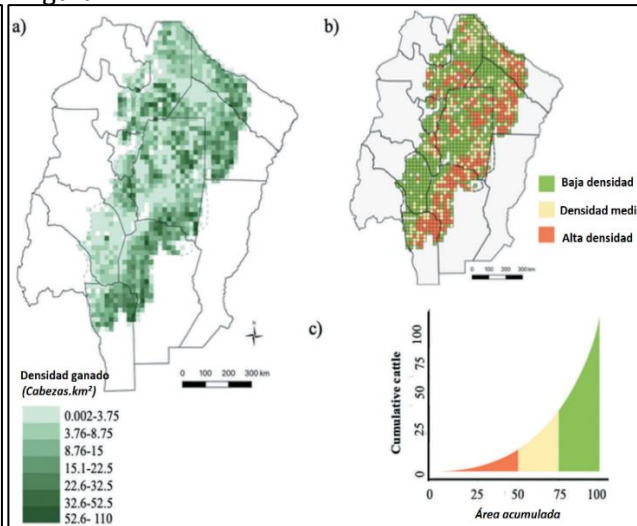
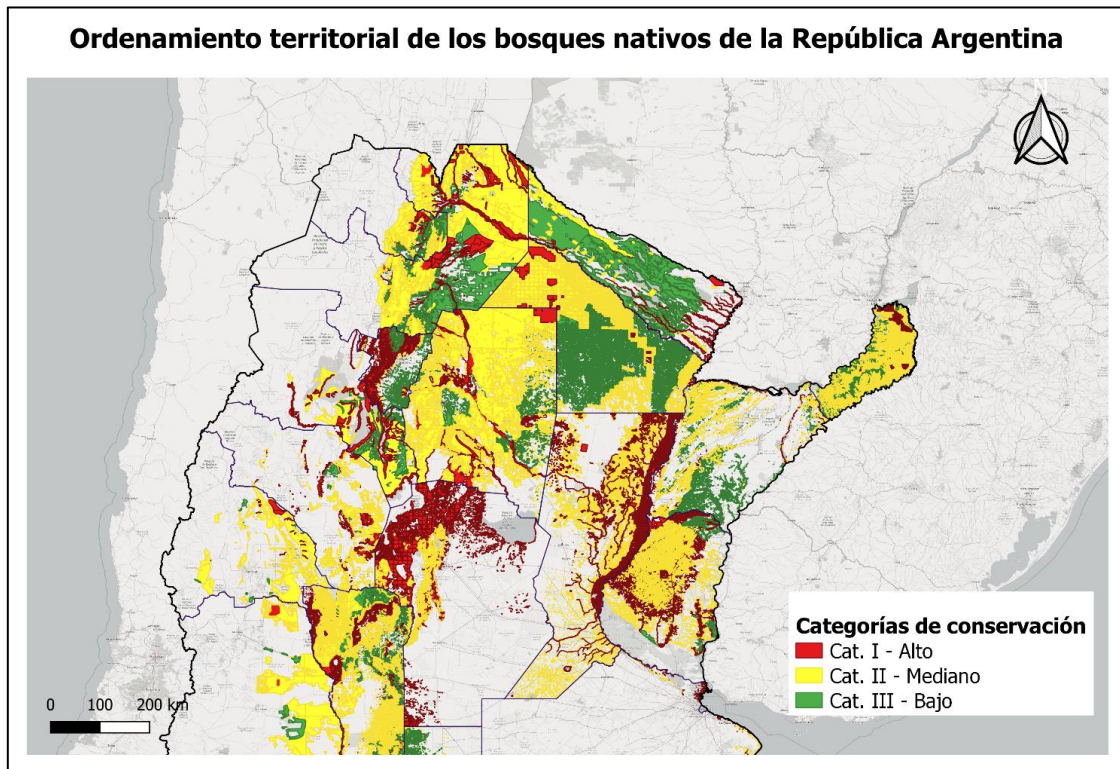


Figura 1.4



2

3



4

5 **Figura 1.5:** Mapa de ordenamiento territorial de la República según Ley Nacional 26.331 de Presupuestos
 6 mínimos de protección ambiental de los bosques nativos. *Fuente: Ministerio de Ambiente y Desarrollo de la*
 7 *Nación – Sistema Integrado de Información ambiental. (<https://sinia.ambiente.gob.ar/geovisor.php#>).*

8

9 **1.1.2. Proceso de intensificación en el Chaco semiárido argentino**

10 Es importante destacar que en la región, así como en otras regiones semiáridas del mundo, las
 11 condiciones de semiaridez y la variabilidad en las precipitaciones son determinantes de los resultados
 12 productivos (Stritzler, 2007; Diaz Solis *et al*, 2009). Esto conduce a marcadas fluctuaciones en la
 13 producción de las pasturas, base principal de la alimentación de los rodeos de cría de la región, y por
 14 lo tanto en la capacidad de carga de los sistemas de producción (McNaughton *et al.*, 1989; Fritz y
 15 Duncan., 1994; O'Reagain *et al.*, 2009). De allí que los productores agropecuarios despliegan una
 16 variedad de estrategias con el fin de estabilizar sus resultados económicos y reducir riesgos (Meinke
 17 y Stone, 2005; Strizler, 2007). Actualmente, muchas de estas estrategias se encuentran relacionadas
 18 al proceso de intensificación ganadera, formando parte de un cambio estructural en sistemas que a
 19 través de muchos años se adaptaron para operar en forma extensiva (Viglizzo, 2001). Sin embargo,
 20 existen grandes incertidumbres acerca del impacto de dicho proceso sobre la eficiencia y estabilidad
 21 de los sistemas (Nasca *et al*, 2015), más aún considerando que en los próximos años es probable que

22 el cambio climático amplifique la variabilidad del ambiente debido al incremento en la frecuencia e
23 intensidad de las sequías (McKeon *et al.* 2009).

24 Los principales indicadores ganaderos señalan que en los últimos años en la región norte del
25 país se observó un proceso de intensificación, especialmente en el estrato de productores con más de
26 500 vientos (Observatorio ganadero, 2013). En las últimas décadas el crecimiento de la agricultura
27 (principalmente relacionado al cultivo de la soja) y su expansión sobre las áreas climáticamente más
28 favorecidas para esta actividad, ha tenido marcadas implicancias en los sistemas bovinos de todo el
29 país y particularmente en los sistemas de cría del Chaco semiárido (Figura 1.2). Frente al avance de
30 la agricultura, la ganadería se reacomodó territorialmente, tanto a nivel de región como dentro de los
31 mismos establecimientos. La intensificación de la producción ganadera se generó principalmente a
32 través del reemplazo de pasturas nativas y pasturas introducidas de baja productividad, por pasturas
33 mejoradas de mayor rendimiento y prácticas de manejo como los pastoreos rotativos (Valentim *et al.*,
34 2009) observándose en los últimos años un aumento significativo de la superficie con pasturas me-
35 gatérmicas implantadas (*Megathyrus maximus*, *Cenchrus ciliaris* y *Chloris gayana*). Adicional-
36 mente, se realizó la incorporación de forrajes conservados y mayores niveles de suplementación a
37 campo a base de granos y subproductos de la agroindustria, que impactó positivamente en la produc-
38 tividad de los rodeos de cría (Observatorio ganadero, 2013). Además, se evidenció una importante
39 mejora genética del rodeo regional, siendo Braford y Brangus los biotipos más utilizados en las em-
40 presas ganaderas de la región (Nasca *et al.*, 2015). Las estrategias de intensificación adoptadas por
41 los productores están basadas tanto en la incorporación de tecnologías de insumos como de procesos,
42 siendo la sub-división de los potreros, la fertilización para incrementar el crecimiento de las pasturas
43 y la utilización de reservas forrajeras (principalmente los silajes planta entera) algunos ejemplos de
44 ello (Clark y Lambert, 1989; Nie *et al.*, 1998; Gillingham *et al.*, 2007). Debido a la extensión de la
45 región, al proceso de intensificación que experimenta y a la diversidad de planteos productivos exis-
46 tentes, la carga animal de los sistemas de cría puede variar entre 0,3 y 2 EV.ha⁻¹ (Nasca *et al.*, 2015).
47 Esta situación, permite observar que muchos sistemas agropecuarios tienen gran potencial para in-
48 crementar su nivel de productividad.

49 Por otro lado, el incremento en el valor de la tierra de los últimos años tuvo un fuerte impacto
50 en los costos de producción, y en los costos de oportunidad de los sistemas agropecuarios en general.
51 Particularmente, en los sistemas ganaderos pastoriles de condiciones extensivas, la volatilidad en los
52 precios de los commodities agrícolas sumado al creciente valor de la tierra, influyeron en la elección
53 del planteo productivo y rentabilidad económica de los sistemas. Actualmente, con el objetivo de

54 mantener o incrementar la escala del negocio para hacer frente a los costos estructurales (mano de
55 obra, mantenimiento de instalaciones y pasturas, etc.) y aumentar la competitividad de la empresa,
56 quienes deciden mantener la actividad, reemplazan año tras año hectáreas de pasturas implantadas,
57 con la siembra de cultivos anuales (soja y/o maíz) (Strizler *et al.*, 2007). Esta situación puede estar
58 asociada a la transición de sistemas ganaderos puros a sistemas mixtos (agrícola-ganaderos) (Vigli-
59 zzo, 2008) o bien, a sistemas que destinan superficie para la confección de sus propias reservas fo-
60 rrajeras, tal es el caso del maíz con destino a silaje de planta entera, insumo base para la intensifica-
61 ción de los planteos de cría en la región. Sin embargo, la adopción de tecnologías vinculadas a la
62 intensificación ganadera no solamente se encuentra asociado al objetivo particular de cada sistema de
63 producción, sino también a las condiciones económicas, políticas y ambientales que afectan en gene-
64 ral la toma de decisiones en la empresa agropecuaria (Williams *et al.*, 2000). En relación a los aspek-
65 tos ambientales, es posible decir que, como en muchas actividades económicas, los sistemas agrope-
66 cuarios afectan y son afectados por el ambiente (Viglizzo *et al.*, 2001).

67 **1.1.3. Impacto ambiental de la intensificación ganadera**

68 El impacto ambiental de la intensificación ganadera puede ser evaluado en función de distintos
69 criterios, como por ejemplo alteraciones en el ciclo del nitrógeno, fósforo y el agua (Conway, 1997;
70 Tilman *et al.*, 2002), o la conservación de recursos naturales y biodiversidad (Grau *et al.* 2005; Phalan
71 *et al.*, 2011b; Tscharrntke *et al.*, 2012). En este estudio se hace énfasis en la problemática del cambio
72 climático.

73 A nivel mundial, es creciente la preocupación sobre el cambio climático debido al aumento en
74 la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera y su efecto sobre la temperatura
75 del aire, la ocurrencia de eventos extremos y las alteraciones en los regímenes de lluvias (IPCC,
76 2013). Particularmente, los sistemas ganaderos contribuyen a este fenómeno mediante las emisiones
77 de metano, óxido nitroso y dióxido de carbono (Steinfeld *et al.*, 2006; Thornton *et al.*, 2009; Cárdenas,
78 *et al.*, 2012; Gerber *et al.*, 2013; Cardoso *et al.*, 2016). Según el Inventario Nacional de gases de
79 efecto invernadero, en Argentina la ganadería representa el 21,6 % de las emisiones (Moreira Muzio
80 *et al.*, 2019) enfrentando un desafío importante en términos de reducción de las emisiones. Desde el
81 punto de vista tecnológico, en los sistemas ganaderos algunas mejoras se encuentran ligadas a la
82 combinación de factores tales como, la alimentación y nutrición mediante el uso de dietas con mayor
83 digestibilidad para reducir las emisiones de metano (Hristov, 2013) y la genética animal (Thornton *et*
84 *al.*, 2009). En sistemas pastoriles también se vincula a pautas relacionadas con el manejo del forraje,
85 tales como la elección del sistema de pastoreo (rotativo vs. continuo), el manejo de la oferta forrajera

86 y la selección de la carga animal (DeRamus *et al.*, 2003; Navarro-Villa *et al.*, 2011). Por otro lado,
87 es importante destacar que si bien la ganadería es un importante emisor de gases de efecto invernadero,
88 el secuestro por parte de pasturas, bosques, arbustales y pastizales que integran los planteos
89 ganaderos pastoriles, juegan un rol determinante en el balance total de las emisiones, siendo recono-
90 cidos como sumideros de carbono (Soussana *et al.*, 2014).

91 En las últimas décadas, los cambios en el uso de la tierra principalmente aquellos asociados al
92 reemplazo de bosques por cultivos anuales y pasturas implantadas, han sido otra de las principales
93 causas de emisiones de CO₂ a la atmósfera (IPCC, 2013; Peters *et al.*, 2013; van der Werf *et al.*, 2009).
94 En general, los sistemas ganaderos de las regiones sub-húmedas y semiáridas se desarrollan sobre
95 superficies de pasturas implantadas que anteriormente estaban conformadas por bosques nativos (Fis-
96 her *et al.*, 1994; Nosetto *et al.*, 2005; Paruelo *et al.*, 2006) o pastizales naturales (Gasparri *et al.*, 2008).
97 En Argentina, la región chaqueña es una de las ecorregiones neotropicales que conserva grandes ex-
98 tensiones no transformadas a agricultura (Grau *et al.*, 2011). Sin embargo, el impacto que ha tenido el
99 avance de la frontera agropecuaria sobre el cambio de uso de la tierra en el norte Argentino estimulada
100 en gran medida por la especulación alrededor del precio de la tierra y la rentabilidad en el corto plazo
101 de la producción agrícola (Gasparri *et al.*, 2008, Volante *et al.*, 2012; Viglizzo *et al.*, 2012), ha gene-
102 rado un fuerte impacto tanto a nivel de las emisiones de GEI, cómo a nivel de la conservación de
103 recursos naturales y biodiversidad. La mayor parte de este período fue previa a la sanción de la ley
104 26.331 de ordenamiento territorial de bosques nativos (Diciembre 2007), factor limitante de las futu-
105 ras tasas de expansión (García Collazo *et al.*, 2013). En particular, en el Chaco semiárido, las emisio-
106 nes a causa de la deforestación para el período 1996-2005 fueron estimadas en 15.65 Gg C, represen-
107 tando uno de los mayores cambios de uso de la tierra en bosques subtropicales de Sudamérica (Gas-
108 parri *et al.*, 2008). Las transformaciones del paisaje en la región del Chaco semiárido bajo escenarios
109 socioeconómicos pueden conducir a una marcada reducción del C almacenado, con la consiguiente
110 emisión neta de C y una disminución en otros servicios ecosistémicos relacionados con el almacena-
111 miento de C proporcionados por estos ecosistemas.

112 En este contexto, y con especial énfasis en la emisión de gases de efecto invernadero, la inten-
113 sificación de los sistemas ganaderos es promovida en general como i) una forma de mejorar las emi-
114 siones por fermentación entérica, ii) una alternativa frente a la expansión de las actividades agrope-
115 cuarias sobre recursos naturales (Latawiec *et al.*, 2014) principalmente sobre zonas de alto y mediano
116 valor de conservación (Figura 1.5), y al mismo tiempo iii) una propuesta para mejorar la eficiencia
117 en términos de producción de carne por unidad de superficie (Tilman *et al.*, 2002, Phalan *et al.*, 2011b,
118 Müller *et al.*, 2012). Sin embargo, también es un modelo con mayor dependencia de insumos externos

119 y energía fósil (Bungenstab, 2004). Considerando que la intensificación de los sistemas de cría bovina
120 en el Chaco semiárido se realiza principalmente en sistemas pastoriles, realizar estimaciones en torno
121 a la dinámica del carbono es fundamental para definir qué sistemas de ganado bovino son más efí-
122 cientes para la región.

123 **1.2. Uso de modelos de simulación en la investigación agropecuaria**

124 Los sistemas agropecuarios son sistemas complejos, caracterizados por el elevado número de
125 componentes interconectados, el gran número de combinaciones y permutaciones posibles de los va-
126 lores de los componentes, y la diferente naturaleza de los mismos (Spedding, 1984). En ellos se ex-
127 presa la diversidad de percepciones, la trama de interacciones entre componentes del sistema y las
128 diferentes escalas espaciales y temporales en las cuales se dan estas interacciones, sumado al elevado
129 nivel de incertidumbre, y los insuficientes conocimientos y comprensión de los procesos involucrados
130 (Verón *et al* 2011). Mediante el estudio de la composición, estructura, entorno y mecanismos que
131 definen a los sistemas de producción (Bunge, 2004) es posible representar las interacciones entre i)
132 las reglas de decisión que dirigen al sistema de producción, ii) los componentes del sistema iii) el
133 ambiente. De esta manera es posible abordar desde una visión sistémica problemas de alta compleji-
134 dad, de carácter multidimensional y a diferentes niveles de agregación, incorporando la escala tem-
135 poral a través del estudio de la dinámica del sistema (Sterman, 2000).

136 Considerando la necesidad de evaluar la respuesta de las acciones de manejo a nivel del sis-
137 tema de producción, y las limitaciones de utilizar modelos reales (Romera *et al.*, 2005), surgen los
138 modelos de simulación como importantes herramientas que permiten explorar aspectos cualitativos y
139 cuantitativos de los sistemas en el tiempo. Los modelos pueden ser utilizados con el propósito de
140 entender, explicar o mejorar el funcionamiento del sistema real que se está representando bajo el
141 espíritu de mejorar el proceso en la toma de decisiones (Sterman, 2000). La toma de decisiones en
142 general y la confección de políticas en particular, requieren diagnósticos correctos y evaluaciones ex-
143 ante de los impactos de dichas decisiones. Combinar el uso de la tecnología como fuente de informa-
144 ción y herramienta para el seguimiento de los sistemas de producción, es un aspecto de gran impor-
145 tancia para mejorar la competitividad de los mismos (Janssen y van Ittersum, 2007). Dado el avance
146 tecnológico, la recopilación de información ya no es un problema, sin embargo, utilizarla de manera
147 eficiente sigue siendo un desafío (Tanure, 2013). Es importante recordar que las simulaciones no son
148 predicciones ni pronósticos futuros. Más bien son escenarios futuros alternativos que pueden desa-
149 rrollarse si las suposiciones detrás de los escenarios resultan ser ciertas.

150 1.3. Objetivos e hipótesis de la tesis

151 El objetivo general de esta tesis fue evaluar el impacto de la intensificación ganadera sobre el
152 comportamiento de diversos sistemas de cría bovina del Chaco semiárido mediante el uso de modelos
153 de simulación. Considerando que la intensificación es actualmente promovida como una forma de
154 mejorar la producción de los sistemas ganaderos de la región del Chaco semiárido, el uso de modelos
155 de simulación permitiría estudiar los diversos factores que afectan estos sistemas de producción (Ro-
156 mera *et al.*, 2004) y abordar la problemática desde una visión sistémica integrando aspectos produc-
157 tivos, económicos y ambientales en el mediano a largo plazo. De este modo, sería posible evaluar si
158 el proceso de intensificación ganadera produce mejoras significativas en el comportamiento de los
159 sistemas o si, por el contrario, ciertas propiedades del sistema, tales como eficiencia y estabilidad, se
160 ven afectadas positivamente en detrimento de otras.

161 Los **objetivos generales** de esta tesis se enumeran a continuación:

- 162 1. Simular niveles de intensificación crecientes bajo diversas condiciones climáticas en
163 sistemas de cría bovina del Chaco Semiárido.
- 164 2. Evaluar el impacto de niveles crecientes de intensificación sobre la eficiencia de siste-
165 mas de cría bovina en términos productivos, económicos y ambientales.
- 166 3. Evaluar el impacto de niveles crecientes de intensificación sobre la estabilidad de sis-
167 temas de cría bovina en términos productivos.

168 A continuación, se identifican las **principales hipótesis** que se abordarán en relación con los
169 objetivos de la presente tesis.

- 170 1. La intensificación de diversos sistemas de cría bovina en la región del Chaco
171 Semiárido genera incrementos en la eficiencia del sistema a través del aumento en la produc-
172 ción de carne por unidad de superficie y en el resultado económico reflejado en el margen
173 bruto del sistema.
- 174
- 175 2. La intensificación de un sistema de cría bovina del Chaco Semiárido incrementa
176 el impacto ambiental en términos de emisiones de gases de efecto invernadero. Niveles cre-
177 cientes de intensificación disminuyen las emisiones de metano asociadas a la fermentación
178 entérica y aumentan las emisiones asociadas a un mayor consumo de energía fósil utilizada.

179

180 3. La intensificación en términos de incremento en la carga animal de los sistemas
181 pastoriles puros se da en detrimento de la estabilidad productiva del sistema. La producción
182 de sistemas con mayor grado de intensificación es más variable debido al efecto que produce
183 la variabilidad en las precipitaciones y producción de forraje característica de regiones semi-
184 áridas.

185
186 4. La incorporación de silaje de maíz como estrategia de alimentación en los sis-
187 temas de cría bovina del Chaco semiárido permite reducir la variabilidad estacional en la can-
188 tidad y calidad de forraje lo cual se traduce en un aumento de la ganancia de peso vivo del
189 ganado e incrementa la estabilidad de los sistemas con inclusión de silaje de maíz en compa-
190 ración a los sistemas de cría pastoriles puros.

191 192 **1.4. Organización de la tesis y objetivos específicos**

193 La tesis está organizada en 4 capítulos:

194 *Capítulo 1.* Se describen los principales antecedentes y estudios realizados en relación a la
195 intensificación ganadera y la utilización de modelos de simulación para investigar la eficiencia y
196 estabilidad de los sistemas de cría bovina del Chaco semiárido.

197 *Capítulo 2.* El objetivo de este capítulo es analizar el impacto de la intensificación de los sis-
198 temas pastoriles de cría bovina sobre variables que definen la producción de carne, el resultado eco-
199 nómico del sistema y la emisión de gases de efecto invernadero por unidad de superficie. Para tal fin,
200 se realizaron evaluaciones principalmente en función de la productividad de carne por hectárea y el
201 margen bruto por unidad de superficie y la emisión de gases de efecto invernadero por unidad de
202 superficie (metano, dióxido de carbono, óxido nitroso). En el presente capítulo se describe el modelo
203 de simulación utilizado y los sistemas de producción simulados, diferenciados entre sí por el nivel de
204 la carga animal, el uso de forrajes conservados, la frecuencia de renovación de pasturas y premisas
205 para el manejo del rodeo comúnmente utilizadas en la región de estudio.

206 *Capítulo 3.* El presente capítulo evalúa el impacto de la variabilidad climática sobre la pro-
207 ducción de carne de los sistemas con distinto nivel de intensificación. Para ello, se analizaron los
208 coeficientes de variación entre: a) la precipitación y producción de forraje, b) la producción de forraje
209 y la carga animal, c) la carga animal y las precipitaciones y d) la carga animal y la producción de
210 carne. Se realizaron comparaciones: i) dentro de sistemas pastoriles puros y; ii) entre sistemas

211 pastoriles puros e intensificados, evaluando en este último caso la incidencia del uso de silaje de maíz
212 planta entera en los esquemas de alimentación.

213 *Capítulo 4:* En este capítulo se discuten los principales hallazgos de esta tesis en relación al
214 conocimiento existente. Además, se plantean posibles nuevos estudios, así como la utilización de la
215 información generada en esta tesis.

216 *Conclusiones*

217

Capítulo 2:

Impacto de la intensificación ganadera sobre la eficiencia de los sistemas de cría del Chaco semi-árido

2. Impacto de la intensificación ganadera sobre la eficiencia de los sistemas de cría del Chaco semiárido

2.1. Introducción

Los sistemas ganaderos del Chaco semiárido argentino, tradicionalmente se han desarrollado bajo condiciones extensivas, sobre pastizales y pasturas tropicales implantadas. Sin embargo, los cambios producidos a nivel tecnológico, el costo de oportunidad de la tierra, y el impacto ambiental que generan los sistemas agropecuarios, han sido grandes factores que incentivaron la necesidad de replantear las estrategias productivas tanto a nivel de predio, como a escala regional. En este sentido, la intensificación de los sistemas agropecuarios se promueve como una forma de mejorar la producción de carne y el resultado económico de la empresa ganadera (Capper *et al.* 2011, Robinson *et al.*, 2015). Sin embargo, la producción de carne bovina en sistemas eficientes y de bajo impacto ambiental constituye un desafío cada vez más relevante (Viglizzo *et al.*, 2008; Garnett *et al.*, 2013; Cardoso *et al.*, 2016). La emergencia de nuevos modelos de producción, así como también la distancia en el tiempo entre las decisiones y sus efectos determinan la necesidad de estudiar largos períodos de tiempo y los comportamientos generales del sistema (Feldkamp, 2004). La demanda de información sobre nuevos sistemas productivos ha crecido en consonancia con la dinámica de dichos procesos. Considerando que la eficiencia de los sistemas ganaderos es un objetivo esencial en el marco de la intensificación sustentable, representa una propiedad generalmente utilizada para evaluarla (Keating *et al.*, 2010; Pretty *et al.*, 2011). En este capítulo, la eficiencia es considerada una propiedad emergente del sistema de carácter multidimensional y por lo tanto será abordada a nivel productivo, económico y ambiental.

2.1.1. Producción de carne

La producción de carne por unidad de superficie es uno de los principales objetivos de los sistemas ganaderos. En este sentido, la carga animal es el principal determinante de la producción secundaria (Mott 1960, Noy-Meir 1973, Cingolani *et al.* 2008). La elección de la carga animal, junto con una estrategia de manejo adecuado para mantener o mejorar la producción de las pasturas es un aspecto crucial para alcanzar el nivel de producción deseado (Diaz solis *et al.*, 2006; Teague *et al.*, 2008). La base forrajera sobre la cual se sustentan los sistemas ganaderos de cría bovina en la región del Chaco semiárido es principalmente de gramíneas megatérmicas de crecimiento estival. En general, el número de animales capaces de aprovechar el forraje disponible en esta época se encuentra limitado por la carga animal que el sistema es capaz de sostener durante el invierno (White *et al.*,

2010). Con el objetivo de mantener y/o incrementar la carga animal del sistema, dos estrategias de manejo han sido ampliamente difundidas: a) la utilización de forrajes conservados (Vogel *et al.*, 1989; Wales *et al.*, 1998; Abdelhadi *et al.*, 2005), b) la incorporación de granos para la suplementación en pastoreo (Marston *et al.*, 1992; Sanson, 1995; White *et al.*, 2010). Actualmente, en los planteos de cría de la región cada vez es mayor la incorporación de silajes (e.g. maíz o sorgo), con el objetivo de compensar las variaciones en la producción del forraje ocasionadas tanto por la distribución característica de crecimiento de las pasturas megatérmicas, como por la variabilidad climática anual e inter-anual. Además, los silajes de planta entera proveen una fuente de energía en forma de almidón y fibra de bajo costo en relación a otros suplementos (Kolver *et al.*, 2001). Por otro lado, la utilización de la suplementación en grano en dietas de base pastoril, principalmente en la categoría de recria, permite incrementar la ganancia de peso vivo en los animales (Muir *et al.*, 1998; Boom and Sheath, 1998, 1999) y la carga global del sistema (Eaton *et al.*, 2011). Un aspecto relevante a considerar a medida que se incrementa la carga animal, es el efecto dominante que ejerce esta variable no solamente sobre la producción animal sino también sobre la productividad, persistencia y estabilidad de las pasturas (Avila *et al.*, 2012). En el caso de trabajar con cargas altas prolongadas en el tiempo, sería importante considerar la frecuencia de renovación de las pasturas para afrontar los cambios en la cobertura y composición de la pastura que puedan ocurrir (Van de koppel y Rietkerk, 2000, White *et al.*, 2010).

2.1.2. Resultado económico

La intensificación de los sistemas de cría se asocia a mayores niveles de productividad animal, y a un uso más eficiente de la tierra, de esta manera permite incrementar el resultado económico de la empresa ganadera (Latawiec *et al.*, 2014). La expresión del margen bruto como resultado económico por unidad de un recurso por el cual compiten dos o más actividades (superficie de tierra, por ejemplo), es ampliamente utilizado para el análisis individual de la empresa ganadera, pero aún más con el objetivo de realizar estudios comparativos entre alternativas de un mismo establecimiento y/o para evaluar el desempeño entre explotaciones de características similares (Alvarado *et al.*, 2011). Tradicionalmente, los sistemas de cría extensivos fueron considerados de bajo nivel de inversión y baja demanda de insumos (Millen y Arrigoni, 2013). Sin embargo, la actual intensificación de los sistemas de cría del Chaco semiárido, denota un proceso sin precedentes en la región y por lo tanto plantea la necesidad de explorar el posible comportamiento de los mismos a medida que se incrementa la carga animal. En general, el problema en determinar cuál es el nivel de carga más adecuado reside en que la degradación ocasionada por cargas demasiado altas, sólo se detectaría en el largo plazo, aunque los beneficios económicos se observarían en el corto plazo, así como también las pérdidas económicas debido al incremento de los costos (Feldkamp *et al.*, 2005).

2.1.3. Impacto ambiental de la intensificación ganadera

La especialización y la intensificación de los sistemas agropecuarios generan procesos que pueden deteriorar la base de recursos naturales sobre la cual se sustenta la producción (De Wit, 1992). Actualmente el impacto de la intensificación de los sistemas ganaderos ha pasado de ser estudiado desde un enfoque productivo a una mirada sistémica contemplando las implicancias sobre el ambiente (Cortner *et al*, 2019). Por un lado, la baja calidad del forraje y producción animal se asocian generalmente a altas emisiones de metano (Tomkins *et al*, 2011). Por otra parte, el óxido nitroso se produce tanto en los suelos a través del proceso microbiano de nitrificación y denitrificación, como también debido al consumo de energía fósil consumida en el proceso de elaboración de suplementos y silaje (Cardoso *et al*, 2016). En relación a la emisión de CO₂, la intensificación de los sistemas ganaderos, incrementa el uso de energía externa ya sea por combustibles fósiles o agroquímicos, lo cual conduce a un incremento de GEI producidos en el sistema y en el segundo caso, además, resultan contaminantes de cuerpos de agua (Viglizzo *et al.*, 2001).

Atendiendo al “Acuerdo de París”, firmado en diciembre de 2015 en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (COP 21) dónde 195 países, incluida Argentina, se comprometieron a reducir las emisiones GEI al año 2030, resulta fundamental la cuantificación de las emisiones en los distintos sectores, subsectores y cadenas de producción para la recolección de datos, compilación, garantía y control de calidad, y generación de informes (inventarios nacionales de GEI). En este contexto, la huella de carbono ha sido ampliamente difundida al ser considerada una herramienta capaz de contribuir en la mitigación de GEI involucrando productores, industria, consumidores, tomadores de decisiones e investigadores (Picasso *et al.*, 2014). La huella de carbono, también denominada “intensidad de las emisiones”, representa la cantidad total de GEI emitidos por un producto a través del análisis de todo su ciclo de vida, y su unidad de medida es el CO₂ equivalente (gas utilizado como referencia para medir otros GEI) emitido por kilogramo de un producto (Gerber *et al.*, 2013).

En el sector ganadero, la huella de carbono (Kg CO₂ eq.Kg carne⁻¹) es un indicador útil para evaluar el impacto ambiental de la producción de carne sobre el cambio climático (Cardoso *et al.*, 2016; Capper *et al.*, 2011; Wiedemann *et al*; 2015). Sin embargo, las emisiones GEI también pueden expresarse a través de los Kg de CO₂ equivalente por unidad de área (hectárea) de un sistema de producción (Haas *et al.*, 2001; Casey y Holden., 2005b; Beukes *et al.*, 2010; White *et al.*, 2010; Reisinger y Ledgard, 2013, Becoña *et al.*, 2014). Las distintas formas de expresar las emisiones dependen del objetivo de estudio (Crosson *et al.*, 2010) y el contexto dónde se discutirán las políticas

de mitigación (Reisinger *et al.*, 2013). Cuando los resultados son referidos en términos de intensidad de las emisiones, permiten comparar entre distintos productos ya sea dentro de un mismo sistema (Cederberg y Stadig, 2003; O'Brien *et al.*, 2010) o para comparar a nivel nacional e internacional las emisiones a nivel de producto. También se la considera una herramienta para acompañar las decisiones de los consumidores (Reisinger y Ledgard, 2013). En cambio, los resultados expresados en términos absolutos (por unidad de superficie, Kg CO₂eq.ha⁻¹), resultan útiles para evaluar que recurso podría estar contribuyendo en mayor medida a las emisiones del sistema, así como el potencial efecto que podrían generar distintas modificaciones/estrategias en las emisiones a nivel del sistema (Crosson *et al.*, 2011). Si bien estimaciones realizadas de huella de carbono han demostrado que mejorar la eficiencia de producción es altamente relevante para reducir las emisiones, comparar las emisiones en términos de intensidad (Kg CO₂.kg carne⁻¹) o en términos absolutos (Kg CO₂eq.ha⁻¹) puede tener fuertes implicancias en los resultados obtenidos y las estrategias de mitigación, conduciendo en más de una oportunidad a resultados contradictorios (Picasso *et al.* 2014). Considerando que la vulnerabilidad del medio ambiente y la irreversibilidad de muchos procesos son hechos que obligan a evaluar tempranamente el impacto real que pueden ocasionar los sistemas de producción agropecuarios y contemplando que mayores niveles de intensificación podrían llevar a un mayor impacto ambiental, es necesario profundizar el estudio de los nuevos sistemas de producción y prácticas de manejo con el fin de mitigar la emisión de gases de efecto invernadero (White *et al.*, 2010). Cuantificar el impacto generado por las distintas estrategias de manejo en los sistemas ganaderos, permite no solamente realizar aproximaciones para evaluar la responsabilidad del sector sobre el cambio climático, sino también evaluar con antelación el efecto contraintuitivo¹ que muchas veces puede generar una nueva regla de decisión en el sistema (Forrester, 1969; Sterman, 2000).

2.2. Hipótesis

1. La intensificación de diversos sistemas de cría bovina en la región del Chaco Semiárido genera incrementos en la eficiencia del sistema a través del aumento en la producción de carne y el resultado económico reflejado en el margen bruto del sistema.

¹ *Efecto contraintuitivo. Resistencia que surge de un sistema frente a una determinada intervención. Se da cuando en los intentos de resolver un problema, las reacciones no deseadas del mismo superan las expectativas de solucionarlo, y en consecuencia terminan empeorándolo. Este comportamiento surge de la brecha generada entre la complejidad de los sistemas en los que vivimos, y los erróneos y simplificados modelos mentales que guían nuestra toma de decisiones (Sterman, 2012).*

2. La intensificación de un sistema de cría bovina del Chaco Semiárido incrementa el impacto ambiental en términos de emisiones de gases de efecto invernadero. Niveles crecientes de intensificación disminuyen las emisiones de metano asociadas a la fermentación entérica y aumentan las emisiones asociadas a un mayor consumo de energía fósil utilizada.

2.3. Objetivos

El objetivo general de este capítulo fue evaluar el impacto que genera la intensificación de los sistemas bovinos pastoriles sobre variables que definen la producción de carne y el resultado económico del sistema y la emisión de gases de efecto invernadero.

Los objetivos específicos de este capítulo fueron:

- a. Evaluar y comparar la producción de carne en términos de Kg de carne producidos por unidad de superficie frente a distintos escenarios de intensificación.
- b. Evaluar y comparar el resultado económico en términos de margen bruto por unidad de superficie frente a distintos escenarios de intensificación.
- c. Evaluar y comparar el impacto ambiental en términos de emisiones de GEI por unidad de superficie frente a distintos escenarios de intensificación.

2.4. Materiales y Métodos

2.4.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio considerada corresponde al Chaco semiárido argentino, ubicado en la región Chaqueña - ecorregión Gran Chaco Americano- (Cabrera 1976; Morello, 2012) (Figura 1.1). Dado que es un complejo tan extenso, presenta gradientes climáticos de tierras altas a la llanura (O-E y N-S) donde el índice hídrico varía de subhúmedo-húmedo y subhúmedo-seco, presentando áreas de precipitaciones mayores a 300 mm anuales y pendientes menores a 15 grados (Volante, 2012). La franja vecina a las cadenas montañosas, se ve favorecida por un aumento de las precipitaciones, alcanzando valores entre 650 y 900 mm anuales (Morello, 2012). Las precipitaciones marcadamente monzónicas llegan a concentrar en algunos casos hasta el 80% de las lluvias, entre octubre y marzo. Según el atlas de Suelos de la República Argentina (INTA, 1990), los suelos de la región son principalmente Molisoles y le siguen en porcentaje de ocupación los Entisoles y en menor medida los Alfisoles. La distribución espacial de la temperatura media anual, precipitación media anual, evapotranspiración potencial anual y déficit hídrico potencial se muestran en la figura 2.1. En la región se

pueden distinguir dos grandes grupos de sistemas productivos bien diferenciados: sistemas empresariales y sistemas de tipo familiar, definidas principalmente en base a variables tales como el objetivo productivo y la racionalidad económica de quienes dirigen la actividad agropecuaria; la disponibilidad de recursos productivos tierra-capital-trabajo; la vinculación con los mercados; la organización del trabajo; las tecnologías incorporadas y el origen de los insumos utilizados (Lopera Palacio 1991, Carballo 1996; Aparicio y Grass 1999).

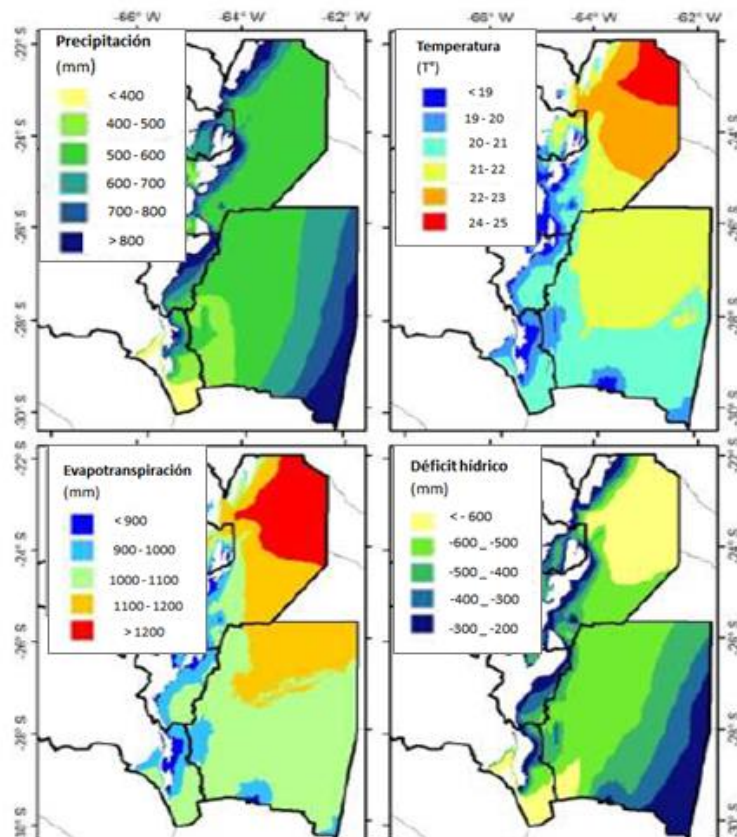
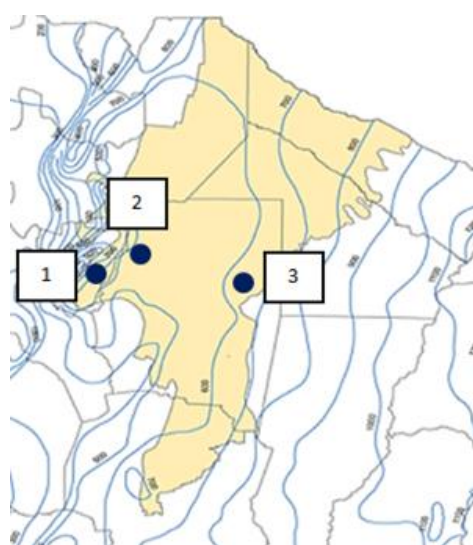


Figura 2.1: Distribución espacial de variables climáticas a resolución espacial de 1km. Mapas elaborados a partir de información disponible en el laboratorio de SIG y Teledetección de INTA (Bianchi *et al.*, 2002).

En función del objetivo de estudio, en este capítulo fueron seleccionadas tres localidades para su análisis: Leales, Quimilí e Isca Yacu correspondientes a las provincias de Tucumán y Santiago del Estero (Figura 2.2). La precipitación media histórica es de 845 mm, 690 mm y 577 mm para Leales, Quimilí e Isca Yacu respectivamente. Alrededor del 70% de las precipitaciones ocurre entre los meses de diciembre y marzo ocasionando una estación seca definida durante la época invernal. De las localidades seleccionadas se cuenta con información de los sistemas productivos, así como también de las características de suelo. El tipo de sistema productivo tomado como referencia para este trabajo corresponde a empresas ganaderas (medianas y grandes) que utilizan mano de obra asalariada, poseen

buena infraestructura y nivel tecnológico (Villarreal, 2009), y están orientados a la cría bovina. El presente estudio propone evaluar el impacto de la intensificación de los sistemas de cría en el Chaco semiárido mediante una perspectiva sistémica, utilizando herramientas de la dinámica de sistemas y modelos de simulación (Sterman, 2000, Morecroft, 2007). El comportamiento de los sistemas se evaluará a través de la propiedad emergente: eficiencia. A continuación, se describen los indicadores y el modelo de simulación utilizado junto con las características principales de los sistemas simulados.



| Precipitación (mm) | Leales | Quimili | I. yacu |
|--------------------|--------|---------|---------|
| Ene | 179 | 119 | 120 |
| Feb | 151 | 93 | 95 |
| Mar | 140 | 95 | 97 |
| Abr | 58 | 63 | 37 |
| May | 23 | 20 | 13 |
| Jun | 11 | 13 | 6 |
| Jul | 5 | 9 | 4 |
| Ago | 6 | 8 | 3 |
| Sep | 13 | 22 | 8 |
| Oct | 44 | 57 | 33 |
| Nov | 85 | 92 | 67 |
| Dic | 130 | 100 | 96 |
| promedio | 845 | 690 | 577 |
| cv | 28 | 35 | 29 |

Figura 2.2. Mapa de la región del Chaco semiárido argentino y las localidades consideradas en el presente estudio: 1. Leales (Tucumán); 2. Isca yacu (Santiago del Estero); 3. Quimili (Santiago del Estero). En la tabla se observa la distribución mensual de la precipitación (mm) junto con la precipitación media anual para las localidades de referencia y el coeficiente de variación interanual (%) correspondiente.

2.4.2. Indicadores utilizados

La incorporación de los modelos de simulación en la investigación agropecuaria permite comparar distintos sistemas de producción en términos relativos más que en términos absolutos (Romera *et al.*, 2005). Tal comparación es posible mediante el uso de diferentes indicadores, seleccionados en función del objetivo de estudio (Smith *et al.*, 2017). Si bien existe una gran diversidad de indicadores propuestos para evaluar la eficiencia de los sistemas agropecuarios, en este capítulo, la eficiencia se abordará a través de los indicadores productivos, económicos y ambientales señalados en el Cuadro 2.1.

La producción de carne es uno de los principales indicadores utilizados para evaluar la intensificación de los sistemas agropecuarios (Smith *et al.*, 2017) y puede ser expresada de diferentes maneras (Chigwa *et al.*, 2015; Lusigi, 1995). En este trabajo la producción de carne se refiere a los

kilogramos de peso vivo producidos por hectárea al año ($\text{Kg PV} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) como resultante de las distintas categorías del rodeo de cría (terneros/as, vaquillonas vacías al tacto, vaca descarte). Para el análisis económico, el cálculo de margen bruto se realizó estimando el ingreso bruto de la venta de los animales menos los costos directos referidos a alimentación (silaje de maíz y suplementación), gastos de comercialización, gastos administrativos, costos de sanidad animal, amortización de la implantación de pasturas y mano de obra. Los valores fueron expresados en términos de pesos por hectárea al año ($\text{\$.ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$). Los precios de venta para la hacienda, así como también los costos directos se realizaron en base a los precios de mercado correspondientes a mayo de 2017. Por otro lado, el impacto ambiental de la intensificación ganadera se evaluó a través de la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de superficie (Picasso *et al.* 2014, Becoña *et al.* 2014; Fernández Rosso *et al.*, 2018) ya que en este estudio se realiza con mayor énfasis la comparación entre diferentes estrategias de manejo sobre la emisión de GEI a escala de sistema de producción, más que el análisis de ciclo de vida del producto per se (Kg. Carne). Algunos autores señalan que en ganadería es más informativo comparar las emisiones por kilogramo de carne producido y no por unidad de superficie, debido a la diversidad de planteos ganaderos que van desde la producción extensiva a pasto hasta sistemas intensivos de engorde con encierres a corral (Feldkamp *et al.*, 2014). Sin embargo, en términos de la valoración de la emisión de metano como externalidad negativa de los sistemas la emisión por unidad de superficie refleja mejor su impacto (Ghahramani y Moore, 2015). Las estimaciones de CO_2eq se realizaron contemplando las entradas de energía fósil utilizada (Viglizzo *et al.*, 2003), estimaciones de las emisiones de metano asociadas a la fermentación entérica (TIER 2, IPCC 2006) y emisiones de N_2O por excretas (estiércol y orina) depositadas sobre la pastura (Cardoso *et al.*, 2016).

Cuadro 2.1: Indicadores de eficiencia utilizados para evaluar los sistemas de cría bovina del Chaco semiárido.

| Propiedad | Dimensión | Indicador | Unidades |
|------------|------------|--------------------------|----------------------------------|
| Eficiencia | Productiva | Producción de carne | Kg PV/ha/año |
| | Económica | Margen Bruto | $\text{\$/ha/año}$ |
| | Ambiental | Emisión GEI por hectárea | $\text{Kg CO}_2\text{eq/ha/año}$ |

En todos los casos, los cálculos se realizaron a nivel de sistema de producción y son resultado del modelo de simulación ganadero desarrollado por Nasca *et al.* (2015) (ver 1.6.3.). El modelo de simulación (Nasca *et al.*, 2015) tiene la capacidad de generar en forma ordenada la información básica requerida para dichos cálculos tal como la composición del rodeo; las características y productividad animal (e.g. ganancia diaria de peso vivo, consumo de materia seca en megajoules (MJ) por día, peso vivo a la madurez) y las características del forraje utilizado en la dieta (digestibilidad de la materia

seca de granos y pasturas contemplando su variación estacional) entre otros. El modelo incluye estimaciones de las entradas de energía fósil consumida (e.g., síntesis de pesticidas, fertilizantes, concentrados, semillas, actividades agropecuarias involucradas en la preparación del suelo, siembra, aplicación de pesticidas y fertilizantes) y las salidas de productos agropecuarios (Nasca *et al.*, 2015).

2.4.3. Características generales del modelo de simulación utilizado

El modelo de simulación utilizado es dinámico, mecanicista y determinístico y fue desarrollado en el programa Powersim Studio 8® para realizar investigaciones en el área de los sistemas bovinos pastoriles en ambientes semiáridos (Nasca *et al.*, 2015). El modelo utiliza información del ambiente y del sistema para evaluar criterios, regulando los flujos de energía, materia e información (Figura 2.3). El horizonte de simulación utilizado fue de 70 años. Contemplando la fase de estabilización del modelo y a los fines de reducir la incidencia de los valores iniciales del modelo en los resultados, se descartaron los primeros 20 años de simulación (Romera *et al.*, 2005). En función de los objetivos planteados en este estudio y de la duración de los ciclos biológico-productivos involucrados se considera a este lapso suficiente para asegurar la estabilización de los procesos que se simulan.

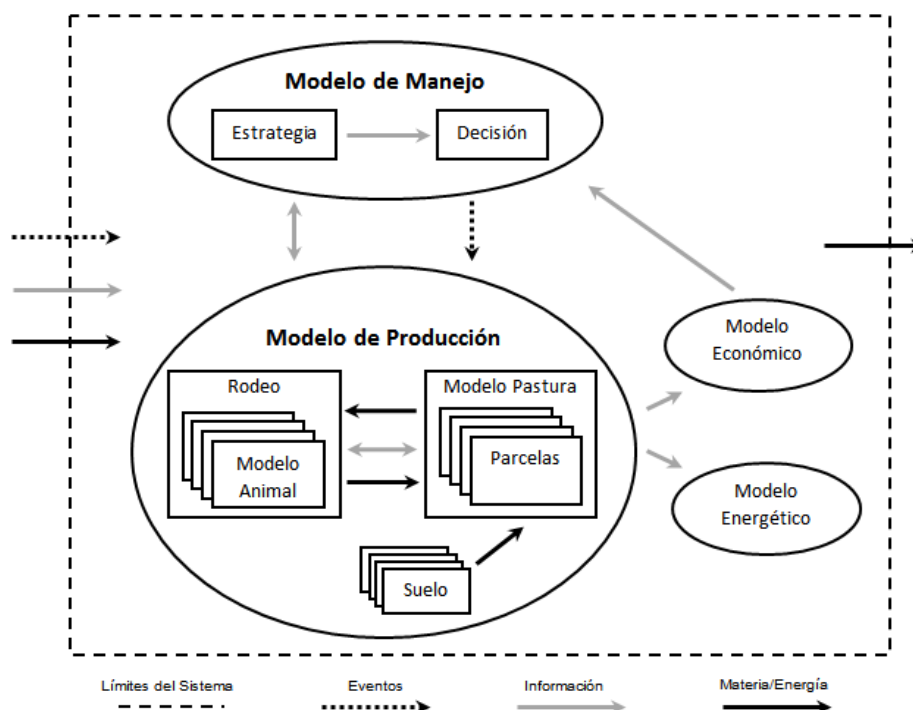


Figura 2.3. Representación simplificada del modelo del sistema de producción (Nasca *et al.*, 2015). Los límites del sistema se encuentran representados por las líneas externas punteadas. Al sistema ingresa información (flechas grises), materia/energía (flechas negras) y eventos (flechas punteadas) que interactúan entre los diferentes componentes del modelo. Como salida principal del sistema se considera el flujo de materia/energía.

Diferentes submodelos estructuran el modelo principal: a) Submodelo de producción y b) Submodelo de manejo en interacción con el modelo energético y el económico. Las cajas dentro del modelo de producción, simbolizan la estructura matricial del rodeo, la pastura y el suelo. La posibilidad de trabajar con matrices permite representar objetos con atributos particulares, agrupados en varias categorías (e.g., categorías de animales en un rodeo, grupo de parcelas de pastoreo por categorías de animales). De este modo, cada componente (e.g., animal y parcela) retiene su individualidad a través del modelo completo. El submodelo de manejo, representa el conjunto de estrategias y reglas de decisión del modelo.

La estructura general del modelo consiste en un modelo de manejo y un modelo de producción. El modelo de manejo incluye procesos regulados por la intervención humana, reglas de decisiones, construidas a partir de condiciones y acciones, que interactúan con los componentes del sistema y el ambiente para producir un patrón de producción (Martin *et al.*, 2012). El modelo de manejo utiliza información del ambiente y del sistema para evaluar criterios, regulando los flujos y determinando la ocurrencia de los procesos. Por lo tanto, el modelo de manejo actúa como vínculo entre el modelo de producción, las entradas y el criterio incorporado por el usuario en el manejo del agro-ecosistema (Feldkamp, 2004). El énfasis del modelo está puesto en la flexibilidad para simular una gran diversidad de estrategias de manejo de sistemas bovinos de cría y en la sensibilidad para explorar variaciones en la carga animal. Antes de una simulación los valores de los parámetros y los umbrales deben ser fijados, y las reglas de manejo especificadas (Nasca *et al.*, 2015). El modelo de producción simula procesos correspondientes al crecimiento de las pasturas (McCall y Bishop-Hurley, 2003), agua del suelo (Cros *et al.*, 2003), crecimiento de los animales (Feldkamp, 2004), reproducción y el consumo animal (Freer *et al.*, 1997). Considerando que el modelo original no contemplaba la dinámica de la producción de silaje, y que el cultivo de maíz es ampliamente difundido en la región para la confección de esta reserva forrajera, se calibró y evaluó el modelo DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) con el objetivo de ser incorporado en el submodelo de silaje de maíz, insumo principal para evaluar los procesos de intensificación ganadera estudiados (ver Anexo 1). El comportamiento del modelo para estimar el rendimiento y captar la variabilidad climática de la región expresó un buen ajuste. Las simulaciones realizadas con DSSAT demostraron consistencia entre los resultados obtenidos y el objetivo de estudio, indicando que es útil para describir la producción de grano del cultivo de maíz y su variación entre años frente a distintas condiciones climáticas, especialmente en relación a las precipitaciones. El uso de distintos desvíos estadísticos permitió evaluar diferentes aspectos de la precisión del modelo.

2.4.4. Características de los sistemas de producción simulados

Los modelos de cría simulados se definieron principalmente en función de la carga animal y de prácticas comúnmente utilizadas en la región. Si bien no es posible encontrar un solo factor que condicione el comportamiento de los sistemas, existen variables centrales (e.g. carga animal) que son necesarias estudiar y evaluar (Senge, 2009). Considerando la importancia del silaje de maíz en los planteos de cría de la región y el rol protagónico que ocupa en la intensificación ganadera, la combinación de su incorporación al sistema y los aumentos en la carga animal, junto con la renovación de pasturas implantadas, representaron tres criterios centrales en la definición de los distintos niveles de intensificación a evaluar. Cada nivel de intensificación fue definido como un tratamiento con ciertas reglas de manejo y supuestos (Cuadro 2.2). La superficie utilizada para todos los tratamientos fue de 500 ha.

En el modelo de simulación se define una variable llamada carga animal objetivo (CAO) que representa el valor objetivo de vientres por unidad de superficie (cabezas.ha⁻¹) (Feldkamp, 2004). La elección de la carga animal (kg.ha⁻¹) fue seleccionada en base a datos disponibles de sistemas reales de producción de la región, así como también al conocimiento local y de asesores técnicos. Los valores de carga animal utilizados fueron: 175, 245, 350, 700, 1050, 1400, 1750 Kg.ha⁻¹. La carga animal 175 (kg.ha⁻¹) fue tomada como el tratamiento testigo ya que es un valor característico de los sistemas pastoriles de cría la región. Por otro lado, el análisis de estrategias de manejo que aún no han sido incorporadas dentro de los esquemas productivos de la región, fueron evaluadas como posibles opciones de intensificación permitiendo forzar el sistema hacia condiciones extremas y explorar su comportamiento en el tiempo. A continuación, se describen las principales reglas de decisión relacionadas al manejo general de cada sistema de producción.

La fecha de servicio seleccionada para el rodeo se fijó entre diciembre y febrero (90 días). Las vaquillonas recibieron el primer servicio a los 25 – 27 meses de edad. Las decisiones de reposición de vientres fueron dinámicas buscando mantener la carga animal objetivo establecida para cada tratamiento. Las vacas y vaquillonas se descartaron y vendieron si al momento del tacto se encontraban vacías. Las reglas de decisiones no contemplaron compras de animales de ninguna categoría. El destete se realizó en forma convencional. Las estrategias de manejo implementadas contemplaron el ajuste de la carga animal y el destete flexible ante situaciones de sequía en la estación de crecimiento de las pasturas. Si el destete anticipado era realizado, se ajustaba la carga animal a través de la venta del 30% de las vaquillonas de reposición y un 20% de las vacas destetadas (Figura 2.4). Considerando la estrecha relación entre la reproducción y estado nutricional del ganado, la condición corporal, la disponibilidad de forraje y la precipitación acumulada en el último trimestre fueron las variables que definen la decisión del destete alternativo para cada año simulado. La estimación de la condición

corporal en el modelo, se basa en la diferencia entre el peso vivo actual de un animal y su peso vivo potencial (Feldkamp, 2004), siendo a su vez, un estimador del estado nutricional del rodeo. A través del consumo de materia seca el modelo de crecimiento animal utilizado distribuye la energía disponible en función de prioridades: a) prioriza crecimiento del tejido magro y la grasa si la energía disponible es alta; b) prioriza crecimiento del magro si la energía disponible para crecimiento es baja. A medida que la disponibilidad de energía se incrementa, la proporción de energía destinada a magro decrece, y la destinada a grasa incrementa. Cuando el consumo de energía no cubre los requerimientos de mantenimiento, gestación o lactancia, los tejidos grasos y el magro pueden ser movilizados. El tejido magro es movilizado solamente para cubrir requerimientos de mantenimiento.

La rotación de los potreros con pasturas implantadas fue programada cuando la disponibilidad del forraje alcanzaba los 1000 Kg MS.ha (White y Richardson, 1991; White y McGinty, 1992). La suplementación se utilizó exclusivamente en vaquillonas de remplazo (e.g., vaquillonas y vacas). El nivel de suplementación se reguló para cubrir un consumo diario de 8.4 Mj EM.kgMS⁻¹ hasta un máximo del 1% del PVV (base seca).

El consumo de silaje de maíz estuvo destinado a la categoría de vacas de cría, y fue regulado por la disponibilidad de la pastura en cada una de las parcelas y la condición corporal de los vientres (escala 1-9) (Wagner *et al.*, 1988) (condición corporal < 4 y Oferta forrajera < 1000 kgMS.ha). La planificación del volumen total de silaje de maíz a producir anualmente en el sistema, fue estimado en base a la diferencia entre la producción promedio de forraje de cada localidad (KgMS.ha⁻¹.año⁻¹) y la demanda del rodeo de cría estimada en función de la carga animal objetivo. La fecha de ingreso del silaje al sistema se imputa el 1 de abril. En el caso que se acumularan reservas por tercer año consecutivo sin llegar a ser consumidas, se suspendía la confección. Tanto el silaje de maíz como la suplementación animal se consideraron una compra del sistema, por lo tanto, variaciones en la demanda de forraje conservado o de granos, tuvieron impacto directo sobre los costos de producción, pero no así sobre la superficie total de pasturas asignada al sistema de cría. La información generada para cada sistema de producción es referida exclusivamente a unidad de superficie ganadera.

Cuadro 2.2: Tratamientos y principales reglas de manejo que definen los distintos niveles de intensificación de los sistemas de cría simulados donde T1, T2 y T3 corresponden a sistemas exclusivamente con alimentación de base pastoril, y T4, T5, T6, T7 a sistemas pastoriles con inclusión de silaje en la dieta.

| Reglas de decisión específicas para cada tratamiento | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 |
| Carga animal objetivo (Kg.ha ⁻¹) | 175 | 245 | 350 | 700 | 1050 | 1400 | 1750 |

| | | | | | | | |
|-------------------------------|----|---|---|----|----|----|----|
| Incorporación de silaje | - | - | - | si | si | si | si |
| Renovación de pasturas (años) | 10 | 8 | 6 | 8 | 5 | 5 | 5 |

Reglas de decisión generales para todos los sistemas

| | |
|---------------------------------|---|
| Recurso forrajero base | Pastura megatérmica implantada. T° base: 12 °C |
| Calidad de las pasturas | Variable en función de la estacionalidad forrajera. Digestibilidad mínima 42 % - máxima 63 % |
| Superficie total asignada | 500 hectáreas |
| Dinámica de pastoreo | Rotación de potreros en función de la disponibilidad de forraje (disponibilidad límite < 1000 kg MS.ha ⁻¹) |
| Biotipo | Cruza <i>Braford</i> |
| Tamaño animal (Frame Score) | Normal 4,07 ± 0,75 (Nasca <i>et al.</i> 2015) |
| Suplementación | Recría vaquillonas reposición: suplementación energética 8,4 MJ/kg. Destete alternativo: suplementación energética 14,6 MJ/kg |
| Duración servicio | Diciembre - Enero – Febrero |
| Edad 1° servicio | 24 meses |
| Estrategias de destete | Destete convencional - Fecha fija al 1° Marzo Destete alternativo en base a la oferta forrajera (< 500 kgMS.ha ⁻¹) y condición corporal de los vientres (< 3,5 CC) al 1° de Diciembre. |
| Estrategias de venta por sequía | Hasta el 30 % de las vaquillonas reposición y 20 % de las vacas de cría |
| Estructura inicial del rodeo | Se asigna una proporción por categoría para inicializar el modelo y luego la estructura del rodeo es resultante de los procesos dinámicos regulados por la carga animal objetivo |

Considerando el impacto de la carga animal sobre la producción y persistencia de las pasturas, el modelo permite modificar la frecuencia de implantación y renovación de las pasturas. Si bien esta estrategia de manejo no afecta el crecimiento y dinámica de la pastura, incrementa los costos directos y el uso de energía fósil.

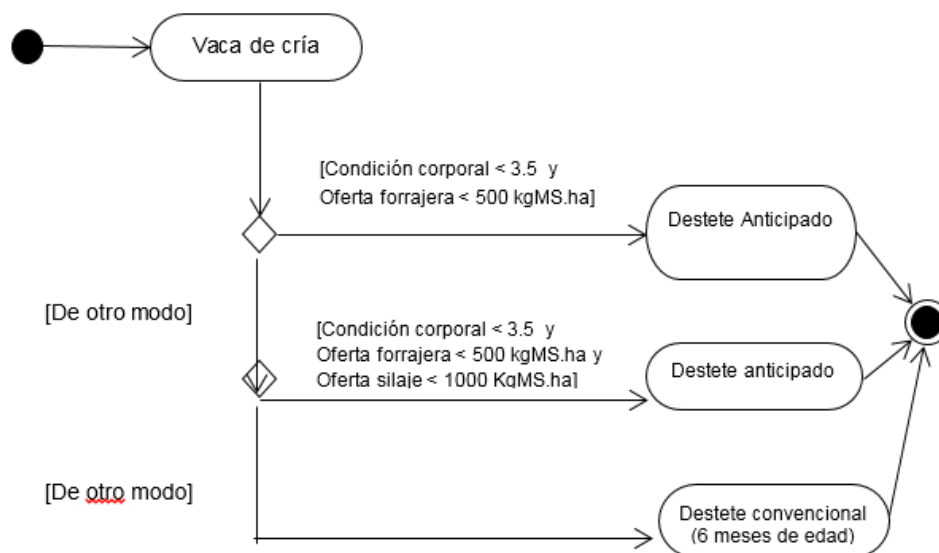


Figura 2.4. Diagrama de modelación de lenguaje unificado representando las reglas de decisión para la estrategia de destete anticipado en sistemas pastoriles puros y pastoriles con incorporación de silaje.

2.4.5. Diseño experimental

El diseño experimental fue completamente aleatorizado y la unidad experimental fue cada sistema de producción. Los tratamientos se definieron en función de los distintos escenarios de intensificación simulados (Cuadro 2.2). Para cada localidad, se realizaron diez repeticiones por tratamiento. Considerando que la incertidumbre climática es un aspecto fundamental de los sistemas agropecuarios, las repeticiones corresponden a distintas series climáticas generadas con la plataforma de simulación estocástica de clima MarkSim™ (Jones y Thornton, 2000). Cada localidad fue considerada un sitio independiente de estudio.

Las salidas estadísticas fueron generadas a través del programa Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2017). La normalidad de los residuos para cada una de las variables en estudio fue evaluada mediante gráficos Q-Q plot y estadísticamente mediante la prueba de Shapiro–Wilk. La homocedasticidad fue probada subjetivamente a través de gráficos de dispersión residuos vs. predichos. Para la comparación de medias entre tratamientos se utilizó la prueba de contraste de Tukey, y las diferencias significativas fueron declaradas cuando $P < 0,05$.

2.5. Resultados y Discusión

2.5.1. Eficiencia de producción

La carga animal lograda en los distintos escenarios de intensificación ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) y para los tres sitios de estudio alcanzó la carga animal objetivo con valores promedio de 196 ± 6 , 259 ± 5 , 366 ± 9 , 728 ± 7 , 1076 ± 12 , 1403 ± 19 y 1701 ± 28 para los tratamientos T1, T2, T3, T4, T5, T6 y T7 respectivamente. La intensificación de los sistemas de cría se tradujo en un aumento de la producción de carne por hectárea ($\text{Kg PV}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) en los tres sitios de estudio ($P<0,05$) (Cuadro 2.3). Los escenarios de mayor carga animal, mostraron mejor comportamiento reflejado en un incremento de la productividad de 8,68 veces con respecto al escenario de menor carga, mientras que una situación de carga intermedia (T4) produjo 3,6 veces más en relación al testigo (T1). Estos resultados son similares a los encontrados por otros autores (Cowan *et al.*, 2000; O'Reagain *et al.*, 2009; White *et al.*, 2010) donde mayores niveles de carga animal, tuvieron un impacto positivo sobre la producción animal por unidad de superficie.

Cuadro 2.3: Producción de carne para los distintos escenarios de intensificación (T1-T7) en términos de producción de carne por hectárea ($\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$).

| | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 |
|-----------|-----------------|------------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|
| Leales | $76 \pm 1,23$ a | $102 \pm 1,87$ b | $133 \pm 11,3$ c | $263 \pm 4,7$ d | $405 \pm 2,2$ e | $536 \pm 5,1$ f | $660 \pm 38,2$ g |
| Quimili | $71 \pm 1,4$ a | $95 \pm 1,1$ b | $130 \pm 2,2$ c | $251 \pm 2,4$ d | $376 \pm 5,6$ e | $495 \pm 8,7$ f | $631 \pm 14,7$ g |
| Isca Yacu | $72 \pm 0,5$ a | $95 \pm 1,9$ b | $133 \pm 2,4$ c | $255 \pm 6,7$ d | $367 \pm 10,1$ e | $495 \pm 8,8$ f | $629 \pm 4,8$ g |

Letras en filas indican diferencias significativas para los diferentes tratamientos de una misma localidad.

En el presente estudio, la carga animal alcanzada expresó una tendencia lineal. Feldkamp (2005) en sistemas de cría sobre pastizales naturales en la región del noreste argentino, al comparar distintos niveles de CAO y carga animal alcanzada, obtuvo un incremento no lineal, indicando que por encima de una CAO $245 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ la carga animal no fue superada. En base a los resultados obtenidos en este estudio, es posible inferir que la posibilidad de incrementar la carga animal estuvo asociada principalmente a la incorporación del silaje en la alimentación. Esto concuerda con estudios realizados en sistemas ganaderos intensificados mediante la utilización de silaje (Wales *et al.*, 1998; Abdelhadi *et al.*, 2005, Cowan *et al.*, 2000). Los porcentajes de inclusión en la dieta variaron entre 26, 39, 51 y 60 % para T4, T5, T6 y T7 respectivamente. Los valores observados en el consumo de silaje ($\text{KgMS}\cdot\text{cab}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$), no solamente variaron en función del nivel de carga sino también por localidad (Figura 2.5). El aumento en la proporción de silaje ofrecido en la dieta fue más acentuado en la localidad de Isca Yacu donde se observó un valor superior cercano al 9% en comparación a las dos localidades restantes. El incremento de la intensificación en los sistemas hasta alcanzar el nivel de carga superior (T7) estuvo acompañado por un incremento promedio de 118 días el consumo de silaje.

De manera similar a lo ocurrido para el consumo total de silaje, la localidad de Isca Yacu requirió una mayor cantidad de días en los cuales se consumió silaje (Cuadro 2.4).

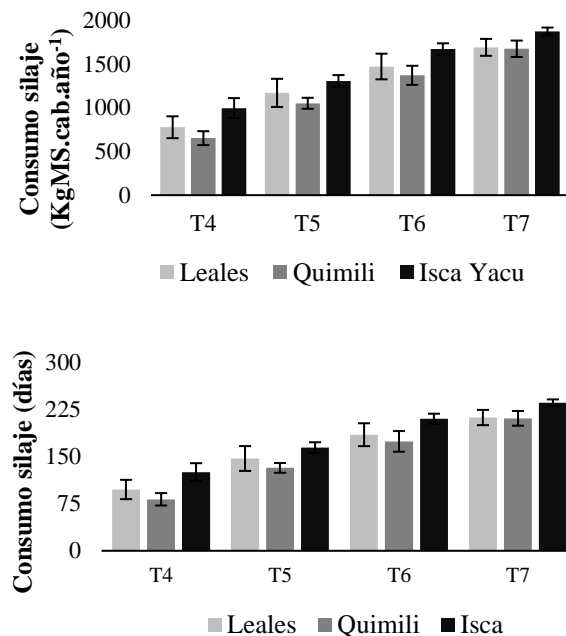


Figura 2.5: Consumo de silaje (KgMS.cab⁻¹.año⁻¹) y días de utilización de silaje (días.año⁻¹) para los sistemas pastoriles T4, T5, T6 y T7 en las localidades estudiadas de Leales, Quimilí e Isca Yacu.

La tasa de preñez es uno de los principales indicadores desde el punto de vista reproductivo para evaluar la eficiencia de los sistemas ganaderos (Dhuyvetter y Caton., 1997; Frick *et al.*, 2003). Los resultados obtenidos en este estudio, indican una tendencia decreciente en el porcentaje de preñez a medida que se intensificaron los sistemas (Cuadro 2.4, $P < 0,05$). Un factor que ha sido ampliamente estudiado y tiene una gran incidencia sobre la tasa de preñez es el consumo de forraje (Cantrell *et al.*, 1982; Stahringer *et al.*, 2001; Rouvier y Yáñez, 2017). En este estudio, la disminución en el consumo forraje explicó el 76% de estos resultados (Figura 2.6). Planteos que no incluyeron silaje en su estrategia de alimentación (pastoreo directo) tuvieron una preñez promedio de $87,9 \pm 1,1\%$ mientras que sistemas que contaron con dicho aporte, y a su vez fueron quienes sufrieron restricciones en el consumo de materia seca, alcanzaron un valor de $85 \pm 0,38\%$ (Cuadro 2.4). De este modo, la intensificación de los sistemas de cría produjo reducciones significativas en este parámetro para todas las localidades, principalmente en los escenarios T4, T6 y T7. En los sistemas de menor intensificación (T1) Leales mostró el mayor porcentaje de preñez.

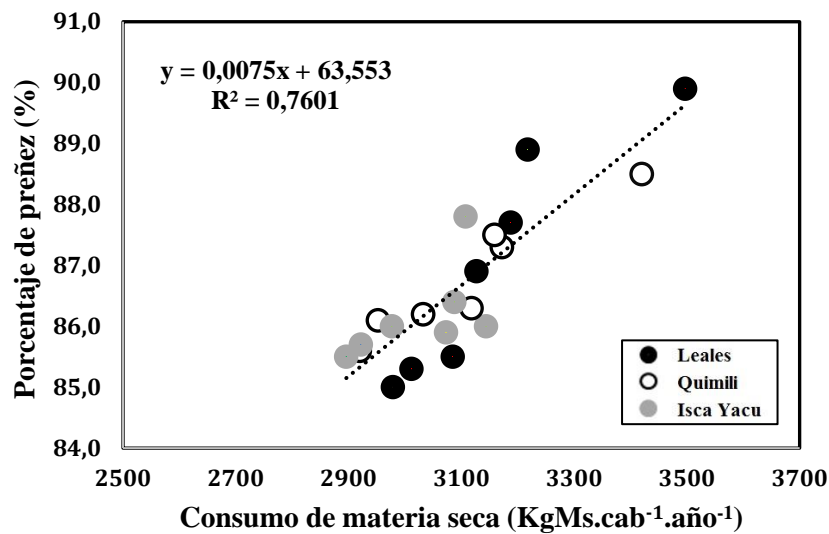


Figura 2.6: Relación entre consumo de materia seca (KgMS.cab⁻¹.año⁻¹) y porcentaje de preñez considerando todos los sistemas productivos (T1-T7) y las tres localidades evaluadas (Leales, Quimilí, Isca Yacu).

La variable kilogramos de ternero destetado por vaca entorada siguió una tendencia similar a lo largo de las 3 localidades alcanzando un valor promedio de 94,7 y 82,8 kg para las cargas mínima (T1) y máxima (T7) estudiadas respectivamente. Para las tres localidades analizadas, las cargas T6 y T7 mostraron los mínimos valores de esta variable (Cuadro 2.4). Particularmente, en Leales e Isca Yacu, la mayor productividad en kg ternero destetado por vaca entorada fue observada cuando los sistemas tuvieron una carga T1 y T2. Mientras que en Quimilí, niveles crecientes de intensificación desde T1 hasta T5 inclusive, no mostraron diferencias significativas (Cuadro 2.4). Feldkamp (2005) evaluó la tasa de destete frente a distintos niveles de carga y también obtuvo una tendencia decreciente a medida que se incrementó la carga animal. Por otro lado, al analizar los kilogramos destetados por hectárea se observó que la intensificación de los sistemas produjo un incremento significativo para esta variable en las tres localidades de estudio (Cuadro 2.4). Estos resultados sugieren la existencia de una relación inversa entre la productividad por vientre entorado y la productividad por unidad de superficie, una variable de importancia a la hora de caracterizar dichos sistemas ganaderos (Figura 2.7).

Las relaciones que existen entre la carga animal, la producción individual por animal y la producción por hectárea han sido ampliamente estudiadas (Mott, 1960; Parsch *et al.*, 1997; Seligman *et al.*, 1989). O'Reagain *et al.* (2009) hallaron diferencias significativas en la producción por hectárea al utilizar distintos niveles de carga animal, remarcando que los sistemas de mayor carga animal si

bien obtuvieron los menores valores de producción por animal, obtuvieron los mayores valores en producción por hectárea. Sin embargo, al analizar la interacción año-nivel de carga, indicaron que no siempre el efecto es significativo, reflejando la incidencia de la variabilidad en las precipitaciones sobre los resultados productivos del sistema. Por otro lado, Fynn y O'Connor (2000) evaluaron el impacto de altas cargas sobre la producción en el largo plazo, y no detectaron reducciones significativas a nivel individual ni por hectárea. Sin embargo, también destacan que en años secos, ambas variables se ven fuertemente afectadas.

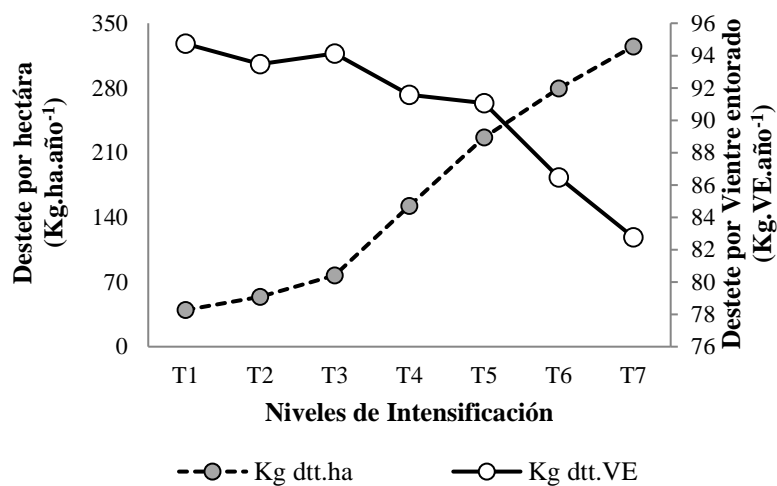


Figura 2.7: Relación entre los kilogramos destetados por hectárea (Kg ha.año⁻¹) y los kilogramos destetados por vientre entorado (KgVE.año⁻¹) a medida que se incrementa la intensificación de los sistemas de cría.

- 1 **Cuadro 2.4:** Principales respuestas observadas en los sistemas de cría simulados para las localidades de Leales, Quimilí e Isca Yacu frente a intensidades
 2 crecientes de intensificación (carga animal, incorporación de silaje de maíz, frecuencia de renovación de pasturas).

| Leales | | | | | | | |
|--|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | 175 | 245 | 350 | 700 | 1050 | 1400 | 1750 |
| Carga animal objetivo (kg.ha ⁻¹) | 175 | 245 | 350 | 700 | 1050 | 1400 | 1750 |
| Carga animal alcanzada (kg.ha ⁻¹) | 198 ± 1,7 a | 260 ± 2,8 b | 355 ± 34,1 c | 725 ± 5,7 d | 1062 ± 9,4 e | 1381 ± 9,6 f | 1668 ± 90,5 g |
| Consumo silaje (KgMS.cab ⁻¹ .año ⁻¹) | 0,0 a | 0,0 a | 0,0 a | 777 ± 125,1 b | 1170 ± 161,5 c | 1472 ± 147,4 d | 1691 ± 97,2 e |
| Días utilización de silaje | 0,0 a | 0,0 a | 0,0 a | 98 ± 15,4 b | 147 ± 19,8 c | 185 ± 18,2 d | 212 ± 12,16 e |
| Consumo pastura (KgMS.cab ⁻¹ .año ⁻¹) | 3497 ± 33,6 f | 3188 ± 28,1 e | 3127 ± 37,2 e | 2366 ± 128,6d | 1914 ± 157,6 c | 1539 ± 149,1 b | 1288 ± 110,2 a |
| Consumo total (KgMS.cab ⁻¹ .año ⁻¹) | 3497 ± 33,6 e | 3188 ± 28,1 d | 3127 ± 37,2 c | 3144 ± 16,4 c | 3085 ± 13,9 b | 3012 ± 12,5 a | 2979 ± 21,5 a |
| Suplementación recría vaquillonas (KgMS.cab ⁻¹ .año ⁻¹) | 185 ± 2,6 a | 184 ± 2,7 a | 181 ± 4,1 a | 386 ± 16,9 b | 566 ± 17,7 c | 679 ± 20,9 d | 766 ± 33,5 e |
| Preñez rodeo (%) | 89,9 ± 0,3 e | 87,7 ± 0,5 d | 86,9 ± 0,6 c | 86,0 ± 0,6 b | 85,5 ± 0,3 a | 85,3 ± 0,5 a | 85,0 ± 0,2 a |
| Terneros destetados por vientre entorado (kg.VE ⁻¹) | 95,8 ± 1,3 e | 94,1 ± 0,6 d | 94,2 ± 0,9 de | 90,1 ± 0,4 c | 89,5 ± 0,6 c | 85,5 ± 0,7 b | 82,8 ± 2,5 a |
| Terneros destetados por hectárea (kg.ha ⁻¹) | 40,3 ± 0,7 a | 54,8 ± 0,5 b | 75,5 ± 7,1 c | 149,2 ± 1,2 d | 220,9 ± 2,2 e | 274,4 ± 3,1 f | 321,1 ± 8,3 g |
| Quimilí | | | | | | | |
| | 175 | 245 | 350 | 700 | 1050 | 1400 | 1750 |
| Carga animal objetivo (kg.ha ⁻¹) | 175 | 245 | 350 | 700 | 1050 | 1400 | 1750 |
| Carga animal alcanzada (kg.ha ⁻¹) | 199 ± 2,6 a | 261 ± 2,4 b | 374 ± 3,9 c | 735 ± 5,6 d | 1083 ± 4,0 e | 1417 ± 8,3 f | 1718 ± 13,4 g |
| Consumo silaje (KgMS.cab ⁻¹ .año ⁻¹) | 0,0 a | 0,0 a | 0,0 a | 652 ± 79,8 b | 1051 ± 62,9 c | 1371 ± 109,3 d | 1675 ± 93,8 e |
| Días utilización de silaje | 0,0 a | 0,0 a | 0,0 a | 82 ± 9,9 b | 132 ± 7,8 c | 172 ± 16,5 d | 211 ± 11,7 e |
| Consumo pastura (KgMS.cab ⁻¹ .año ⁻¹) | 3420 ± 83,3 f | 3172 ± 22,2 e | 3159 ± 17,7 e | 2465 ± 92,6 d | 1983 ± 75,4 c | 1580 ± 11,9 b | 1245 ± 88,9 a |
| Consumo total (KgMS.cab ⁻¹ .año ⁻¹) | 3420 ± 83,3 e | 3172 ± 22,2 d | 3159 ± 17,7 cd | 3118 ± 17,5 c | 3032 ± 8,3 b | 2952 ± 12,9 a | 2920 ± 19,7 a |
| Suplementación recría vaquillonas (KgMS.cab ⁻¹ .año ⁻¹) | 144 ± 4,8 a | 144 ± 4,9 a | 147 ± 7,2 a | 416 ± 20,8 b | 593 ± 14,3 c | 702 ± 24,6 d | 793 ± 19,6 e |
| Preñez rodeo (%) | 88,5 ± 0,4 d | 87,3 ± 0,2 c | 87,5 ± 0,3 c | 86,3 ± 0,3 b | 86,2 ± 0,1 b | 86,1 ± 0,3 ab | 85,6 ± 0,6 a |
| Terneros destetados por vientre entorado (kg.VE ⁻¹) | 93,1 ± 0,4 c | 92,7 ± 0,2 c | 93,1 ± 0,3 c | 92,7 ± 0,3 c | 91,9 ± 0,1 c | 87,4 ± 0,3 b | 82,8 ± 0,3 a |
| Terneros destetados por hectárea (kg.ha ⁻¹) | 38,8 ± 0,6 a | 53,1 ± 0,6 b | 76,8 ± 1,1 c | 154,5 ± 1,9 d | 229,1 ± 1,3 e | 284,3 ± 8,1 | 327,1 ± 1,7 g |
| Isca Yacu | | | | | | | |
| | 175 | 245 | 350 | 700 | 1050 | 1400 | 1750 |
| Carga animal objetivo (kg.ha ⁻¹) | 175 | 245 | 350 | 700 | 1050 | 1400 | 1750 |
| Carga animal alcanzada (kg.ha ⁻¹) | 188 ± 0,8 a | 253 ± 2,5 b | 365 ± 3,9 c | 721 ± 4,8 d | 1082 ± 5,9 e | 1408 ± 3,2 f | 1715 ± 6,7 g |
| Consumo silaje (KgMS.cab ⁻¹ .año ⁻¹) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 996 ± 114,3 | 1307 ± 66,9 | 1673 ± 64,25 | 1873 ± 44,60 |
| Días utilización de silaje | 0,0 a | 0,0 a | 0,0 a | 125 ± 14,3 b | 164 ± 8,4 c | 210 ± 7,9 d | 236 ± 5,3 e |
| Consumo pastura (KgMS.cab ⁻¹ .año ⁻¹) | 3218 ± 12,6 f | 3088 ± 28,9 e | 3108 ± 21,6 e | 2076 ± 120,1 d | 1669 ± 69,1 c | 1248 ± 64,6 b | 1022 ± 38,9 a |
| Consumo total (KgMS.cab ⁻¹ .año ⁻¹) | 3218 ± 12,6 f | 3088 ± 28,9 de | 3108 ± 21,6 e | 3073 ± 11,2 d | 2977 ± 9,3 c | 2922 ± 4,8 b | 2896 ± 12,6 a |
| Suplementación recría vaquillonas (KgMS.cab ⁻¹ .año ⁻¹) | 181 ± 0,8 a | 1179 ± 2,2 a | 192 ± 7,8 a | 541 ± 16,8 b | 712 ± 16,6 c | 804 ± 11,5 d | 885 ± 10,1 e |
| Preñez rodeo (%) | 88,9 ± 0,3 e | 86,4 ± 0,4 c | 87,8 ± 0,5 d | 85,9 ± 0,3 ab | 86,0 ± 0,3 bc | 85,7 ± 0,2 ab | 85,5 ± 0,2 a |
| Terneros destetados por vientre entorado (kg.VE ⁻¹) | 95,3 ± 0,6 e | 93,6 ± 0,2 e | 95,1 ± 7d | 91,9 ± 0,6 c | 91,8 ± 0,4 c | 86,5 ± 0,2 b | 82,7 ± 0,6 a |
| Terneros destetados por hectárea (kg.ha ⁻¹) | 40,0 ± 0,3 a | 53,6 ± 0,7 b | 79,4 ± 0,9 c | 153,4 ± 1,5 d | 229,9 ± 1,6 e | 280,2 ± 0,8 f | 326,9 ± 1,8 g |

3

4

5

Letras en filas indican diferencias significativas para los diferentes tratamientos de una misma localidad.

2.5.2. Resultado económico

El desempeño económico, medido en términos de margen bruto ($\$.ha^{-1}.a\tilde{n}o^{-1}$) se observa en el Cuadro 2.5. Si bien determinar el nivel de intensificación “óptimo” en términos de resultado económico no es un objetivo de este estudio, el comportamiento de los distintos sistemas de cría simulados sugiere un límite en la intensificación en relación al margen bruto al alcanzar el nivel de intensificación T6 en las localidades de Leales y Quimilí, y T5 en Isca Yacu. En todos los escenarios de intensificación, Isca Yacu presentó los menores valores de margen bruto. Según los resultados obtenidos, podría decirse que la intensificación de los sistemas de cría produjo resultados diferentes para las tres localidades en términos de resultado económico, en particular cuando la carga animal fue superior al nivel T4 de intensificación.

Cuadro 2.5: Resultados obtenidos de Margen bruto ($\$.ha^{-1}.a\tilde{n}o^{-1}$) para los distintos escenarios de intensificación (T1-T7) en las localidades estudiadas Leales, Quimilí e Isca yacu.

| Margen Bruto ($\$.ha^{-1}$) | Leales | Quimilí | Isca |
|-------------------------------|----------------|-----------------|----------------|
| T1 | 700 ± 32,1 a | 547 ± 62,5 a | 653 ± 20,2 a |
| T2 | 1008 ± 80,3 a | 987 ± 34,9 b | 933 ± 75,7 b |
| T3 | 1593 ± 235,7 b | 1607 ± 151,1 c | 1638 ± 133,6 c |
| T4 | 3235 ± 161,6 c | 3494 ± 101,8 d | 2885 ± 130,7 d |
| T5 | 4905 ± 436,9 d | 5111 ± 119,3 e | 4391 ± 161,9 e |
| T6 | 5270 ± 258,6 e | 5561 ± 472,2 f | 4415 ± 205,5 e |
| T7 | 5258 ± 346,3 e | 5269 ± 258,6 ef | 4311 ± 153,1 e |

Letras en columnas indican diferencias significativas para los diferentes tratamientos de una misma localidad.

El costo directo es un componente esencial del resultado económico de la empresa ganadera. En los sistemas de cría simulados, el costo directo aumentó significativamente ($P < 0,05$) a medida que los sistemas se intensificaron (Cuadro 2.6), excepto en la localidad de Leales para los escenarios T1 y T2 donde no hubo diferencias significativas. La variación de este parámetro ($\$.ha^{-1}$) entre el sistema de mayor (T7) y menor intensificación (T1) fue de 8503, 8720 y 9591 para Leales, Quimilí e Isca Yacu respectivamente. Es importante destacar que el aumento en el costo directo como resultado de la intensificación en aquellos sistemas que operaron con valores de carga animal por encima de 350 $Kg.ha^{-1}.a\tilde{n}o^{-1}$, fue principalmente debido al incremento en la utilización de silaje y la suplementación energética en la recría de vaquillonas de reposición.

Cuadro 2.6: Resultados obtenidos en relación al Costo directo total ($\$.ha^{-1}.a\tilde{n}o^{-1}$) para los distintos escenarios de intensificación y localidades estudiadas.

| Costo directo ($\$.ha^{-1}.a\tilde{n}o^{-1}$) | Leales | Quimilí | Isca Yacu |
|---|----------------|-----------------|-----------------|
| T1 | 1324 ± 3,1a | 1407 ± 79,3 a | 1320 ± 2,7 a |
| T2 | 1693 ± 73,1 a | 1655 ± 48,9 b | 1688 ± 73,9 b |
| T3 | 2103 ± 203,9 c | 2180 ± 154,5 c | 2218 ± 147,1 c |
| T4 | 4047 ± 139,9 d | 4033 ± 108,1 d | 4533 ± 103,9 d |
| T5 | 5878 ± 195,7 e | 5953 ± 104,8 e | 6604 ± 102,7e |
| T6 | 7845 ± 309,9 f | 7990 ± 243,5 f | 8757 ± 149,6 f |
| T7 | 9827 ± 602,6 g | 10127 ± 244,5 g | 10911 ± 181,4 g |

Letras en columnas indican diferencias significativas para los diferentes tratamientos de una misma localidad.

La transición entre un sistema con alimentación de base exclusivamente pastoril (T3) y otro que incluyó la oferta de silaje con el consiguiente aumento de la carga (T4) se tradujo en un incremento de 194% en el costo directo. En este sentido, la participación del silaje en los costos directos de producción varió entre un 14,9 y 32,9 % para Leales, 12,6 y 32,4 % para Quimilí, y entre 17,2 y 33,6 % para Isca yacu en relación al sistema T4 y T7 respectivamente (Figura 2.8).

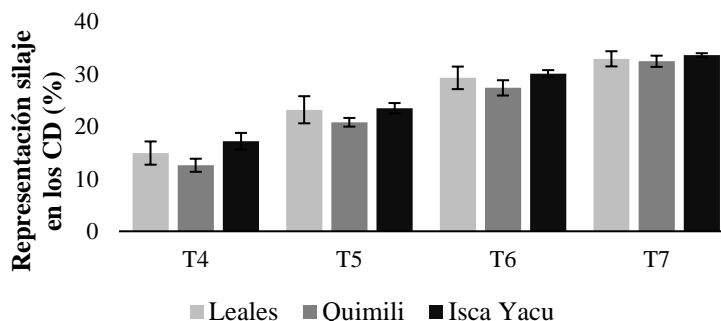


Figura 2.8: Representación porcentual del silaje en los costos directos de los sistemas de cría correspondientes a los tratamientos T4, T5, T6 y T7. Las barras por encima de las columnas representan el desvío estándar de cada tratamiento.

Por otro lado, la cantidad de suplementos utilizados también afecta el desempeño económico de los sistemas ganaderos (Ruiz *et al.*, 2000; Browne *et al.*, 2013). El uso de la suplementación energética ($kg.cab.a\tilde{n}o^{-1}$) destinada a la recria de vaquillonas para reposición demostró un incremento significativo (161%) en las tres localidades estudiadas cuando la carga animal se incrementó de T3 a T4. La transición de un sistema de carga T3 a uno de T4 en relación a la suplementación implicó una participación del 17, 20 y 22 % en los costos directos para Leales, Quimilí e Isca yacu respectivamente

(Figura 2.9-a). A partir de este punto, el aumento en la carga animal del sistema, fue reflejado en un aumento lineal del uso de suplementación (Figura 2.9-b). El costo de suplementación alcanzó un valor cercano al 35% en los sistemas de mayor intensificación. La tendencia de esta variable mostró un comportamiento similar para las tres localidades y niveles de carga animal analizados. Finalmente, el costo total de alimentación, incluyendo silaje y suplementación, llegó a representar desde un 34% (T4) hasta un 68% (T7).

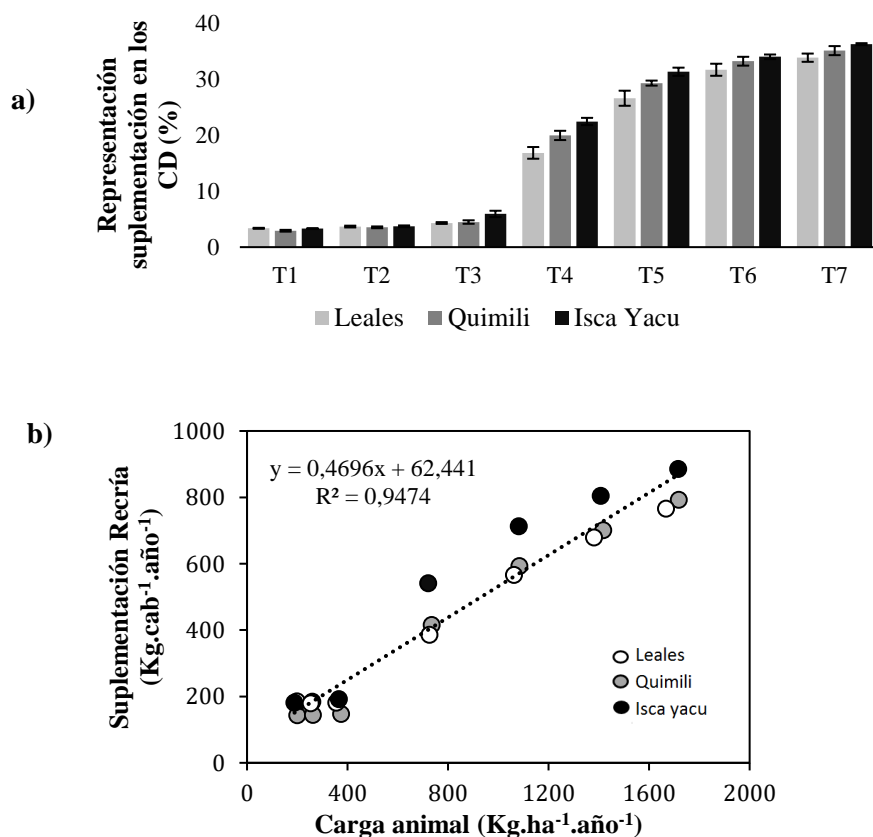


Figura 2.9: a) Representación de la suplementación en los costos (%) para cada uno de los escenarios de intensificación y localidades estudiadas; b) Relación entre el nivel de carga animal ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) y la utilización ($\text{Kg} \cdot \text{cab}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) de la suplementación destinada a la recría.

Kothmann *et al.* (1971), Knight *et al.* (1990) y Burrows *et al.* (2010) coinciden en que el mejor comportamiento de los sistemas en términos económicos se alcanza a medida que estos se intensifican, siendo las cargas más altas las que obtienen los mayores valores de resultado económico. Sin embargo, altas cargas pueden resultar antieconómicas en el mediano y largo plazo, debido al elevado costo de capital inmovilizado y los costos directos de alimentación, principalmente en años de sequía (White *et al.*, 2010; O'Reagain *et al.*; 2011). Por otro lado, cargas muy bajas pueden elevar el costo

de oportunidad de la tierra (Whitson *et al.*, 1982). O'Reagain *et al.* (2011) sugieren que cargas moderadas generan el mejor margen bruto, a diferencia de Teague *et al.* (2009) y Feldkamp (2005) quienes obtuvieron en cargas bajas los mejores resultados económicos ($\$ \cdot \text{año}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$). Algunos autores (Doren *et al.*, 1985; Turner *et al.*, 2013) sostienen que la fortaleza de los sistemas extensivos radica en mantener bajos los costos de producción, más que en incrementar los niveles de producción. Esto podría lograrse principalmente mediante estrategias de manejo que permitan incrementar la eficiencia del sistema, como la subdivisión de potreros, manejo adecuado de la carga animal y control sobre la época de servicio y parición en función de la oferta y demanda de forraje (Kothmann y Smith, 1983; White *et al.*, 2010).

2.5.3. Impacto ambiental

En términos de emisión de gases de efecto invernadero por unidad de superficie, los sistemas con mayor nivel de intensificación tuvieron mayores valores de emisión (Cuadro 2.7). Sistemas ganaderos pastoriles con bajo nivel de intensificación (T1) emitieron 8,26 veces menos que los sistemas con la máxima carga animal simulada (T7). A diferencia de la localidad de Leales, donde no se observaron incrementos significativos en las emisiones para los sistemas T1 y T2, todos los escenarios de aumento en la carga animal resultaron en un incremento significativo de las emisiones.

Cuadro 2.7: Resultados obtenidos de emisiones por hectárea ($\text{Kg CO}_2\text{eq} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) para los distintos escenarios de intensificación (T1-T7) y localidades estudiadas.

| $\text{Kg CO}_2\text{eq} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ | Leales | Quimilí | Isca Yacu |
|--|-----------------|----------------|----------------|
| T1 | 1245 ± 9,6 a | 1225 ± 17,6 a | 1167 ± 3,02 a |
| T2 | 1608 ± 17,1a | 1588 ± 13,1 b | 1542 ± 16,4 b |
| T3 | 2148 ± 193,1 b | 2210 ± 21,4 c | 2156 ± 22,9 c |
| T4 | 4183 ± 59,9 c | 4292 ± 37,5 d | 4207 ± 171,8 d |
| T5 | 6221 ± 109,1 d | 6220 ± 45,4 e | 6220 ± 53,6 e |
| T6 | 8170 ± 156,7 e | 8140 ± 81,8 f | 8125 ± 86,9 f |
| T7 | 10018 ± 670,7 f | 9974 ± 106,5 g | 10042 ± 72,1 g |

Letras en columnas indican diferencias significativas para los diferentes tratamientos de una misma localidad.

En relación a la composición de las emisiones, en términos generales el metano es el gas de efecto invernadero que representó mayor proporción de las emisiones con 92%, seguido por CO₂ y N₂O con valores de 4,6 y 3,6 % de las emisiones, respectivamente. En la figura 2.10, se observa como la composición de las emisiones varían en función del nivel de intensificación, sugiriendo que cuando los sistemas son exclusivamente pastoriles (T1, T2, T3) y experimentan un aumento en la carga animal por hectárea, incrementan en términos relativos los porcentajes de metano y óxido nítrico, mientras que los niveles de CO₂ disminuyen. Luego, si los sistemas aumentan su intensificación se observa

una disminución en los valores relativos de óxido nitroso y principalmente de metano, debido en este último caso a las mejoras ocurridas en la digestibilidad de la dieta (Kurihara *et al.*, 1999). Sin embargo, a mayores niveles de intensificación, se incrementó en términos relativos la emisión de CO₂ a causa de la mayor utilización de insumos externos y energía fósil involucrados en el proceso de producción. En las tres localidades, si bien la variación en la composición de las emisiones de carbono por hectárea presentó una tendencia similar, en los sistemas que se intensificaron por encima de T3 Quimilí mostró los mayores valores de metano, mientras que Isca yacu mostró los mayores valores de CO₂.

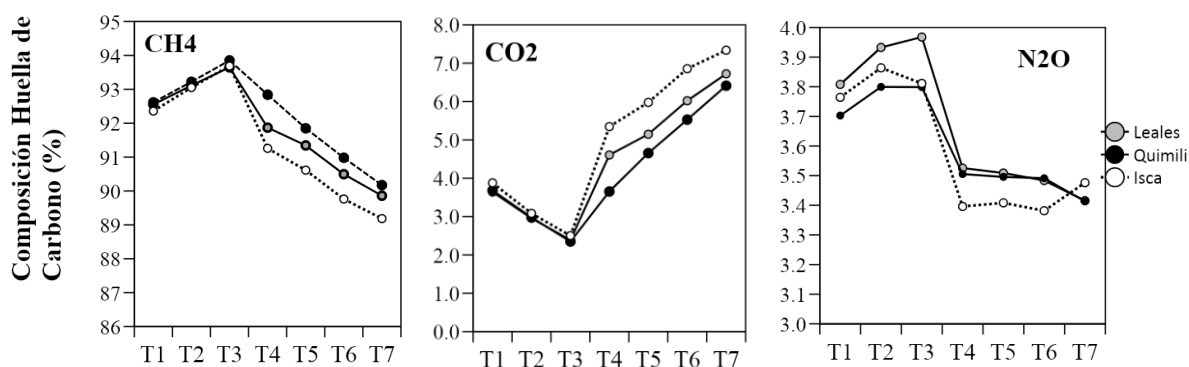


Figura 2.10: Composición de las emisiones en términos porcentuales (%) para cada una de las localidades y tratamientos evaluados (T1-T7).

A medida que se intensificaron los sistemas de cría, la producción de carne se incrementó junto con el margen bruto, sin embargo, dicho incremento no fue lineal. Mayores niveles de intensificación, si bien expresaron mejor comportamiento en términos de producción de carne, generaron incrementos decrecientes en el margen bruto de los sistemas de cría estudiados. Dicho comportamiento fue similar en las tres localidades. En la Figura 2.11 puede observarse la relación entre el margen bruto y la producción de carne. Los resultados obtenidos sugieren que las mejores relaciones entre ambas variables se obtienen para T3, T4 y T5. Sin embargo, por encima de 350 Kg.ha⁻¹.año⁻¹ (T3) no se obtienen marcadas diferencias en los incrementos de margen bruto entre dichos tratamientos. Luego, sistemas con un nivel de intensificación mayor a T5, si bien logran mejores resultados de producción de carne, la relación margen bruto:producción de carne (MB:PC) comienza a ser cada vez menor.

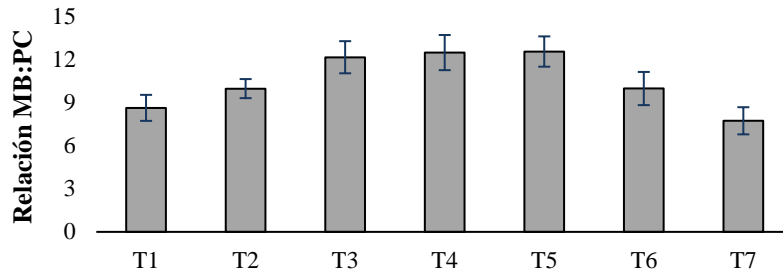


Figura 2.11: Relación entre el margen bruto ($\$.ha.año^{-1}$) y la producción de carne ($kg.ha.año^{-1}$) (MB:PC) para los distintos escenarios de intensificación evaluados (T1-T7) considerando las tres localidades de estudio Leales, Quimili e Isca yacu. Las barras por encima de las columnas representan el desvío estándar de cada tratamiento.

Al analizar de manera individual el incremento de la producción de carne por hectárea y el margen bruto relativo al nivel de intensificación precedente (por ejemplo T2 respecto a T1; T3 respecto a T2), se observó que la producción de carne por hectárea presenta incrementos relativos similares para los sistemas con mayor nivel de intensificación, sin embargo el margen bruto a partir del T4 (Leales y Quimili), y T5 (Isca yacu) experimenta incrementos relativos decrecientes al punto de hacerse negativos en las dos últimas localidades (Figura 2.12-a y b).

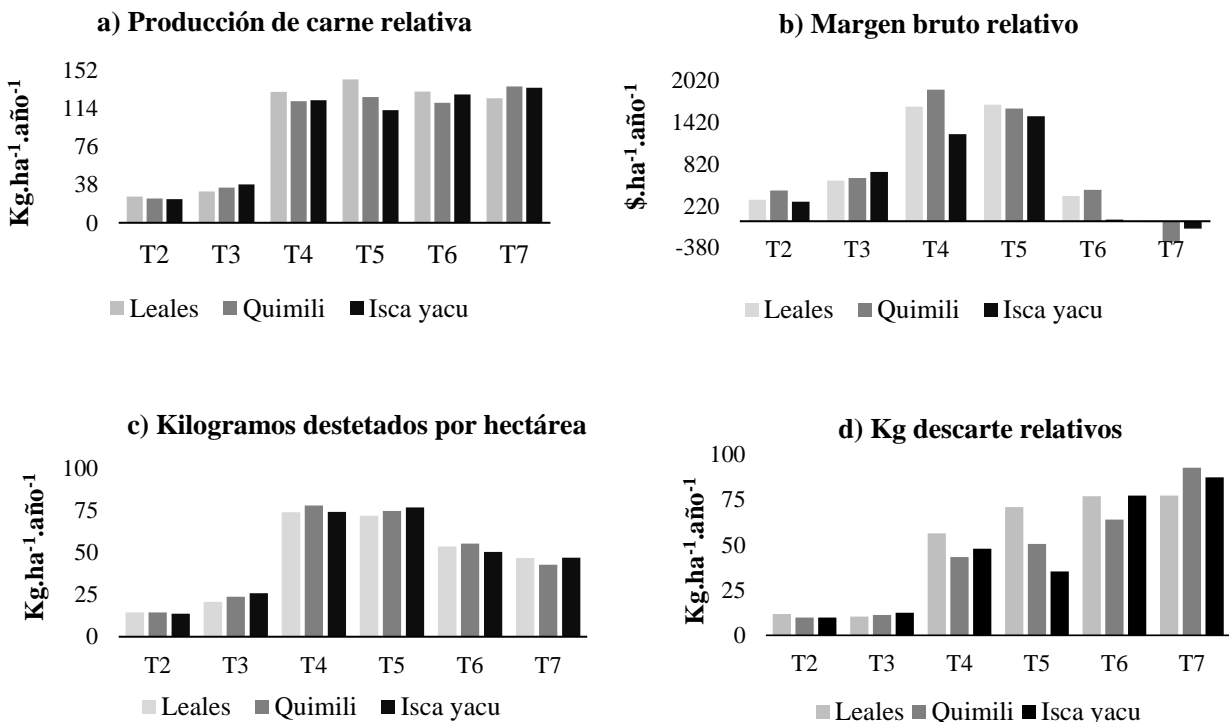


Figura 2.12: a) Incrementos relativos en función del nivel de intensificación precedente para a) Producción de carne ($Kg.ha.año^{-1}$); b) Margen bruto ($\$.ha^{-1}.año^{-1}$); c) Kilogramos destetados por hectárea en relación al nivel de intensificación precedente para las distintas localidades estudiadas; d) Kilogramos de descarte

relativos al nivel de intensificación precedente ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) para las tres localidades de estudio y los distintos escenarios de intensificación (T1-T7).

Considerando que los Kg destetados por hectárea son uno de los principales factores que determinan el resultado productivo de la empresa ganadera, es posible observar que a medida que se intensificaron los sistemas, esta variable se incrementó en términos relativos hasta T5 ($1050 \text{ Kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) (Figura 2.12-c), luego mayores niveles de intensificación generaron incrementos relativos decrecientes impactando sobre el ingreso bruto. Sin embargo, la tendencia de los costos directos relativos asociados a mayores niveles de intensificación no disminuyó (Figura 2.15-a y b). Por otro lado, se observó que a mayores niveles de intensificación aumentaron los kilogramos de descarte de cada sistema (Figura 2.12-d).

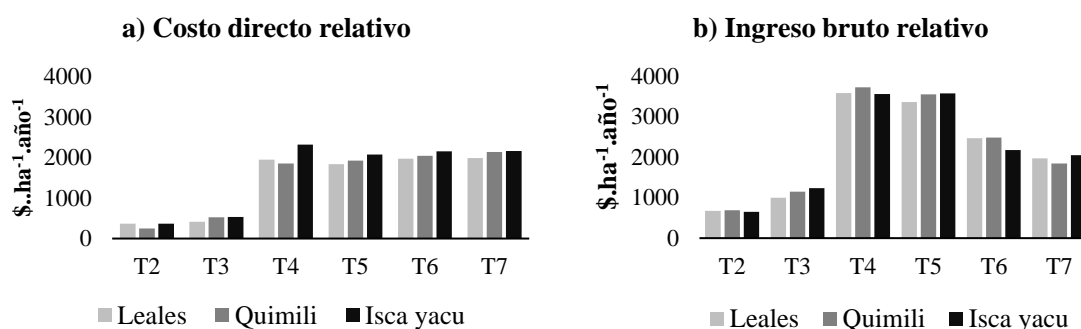


Figura 2.13: a) Costo directo relativo ($\text{\$.ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) y b) Ingreso bruto relativo al nivel de intensificación precedente para los distintos tratamientos (T1-T7) y localidades estudiadas.

En relación al impacto ambiental que genera la intensificación de los sistemas de cría en la región del Chaco semiárido, los resultados obtenidos muestran una asociación positiva entre producción de carne y emisiones de GEI (Figura 2.14). Si bien en los tres sitios de estudio se mantiene esta tendencia y los valores absolutos de las emisiones son cercanos entre localidades (Cuadro 2.11), en términos porcentuales la localidad de Isca Yacu presenta valores de CO_2 más acentuados. Esto puede estar relacionado con el mayor consumo de energía fósil utilizado en el proceso de intensificación para alcanzar mayores niveles de producción de carne ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$), principalmente respecto al uso de silaje y granos para la suplementación de la recría (Cuadro 2.7).

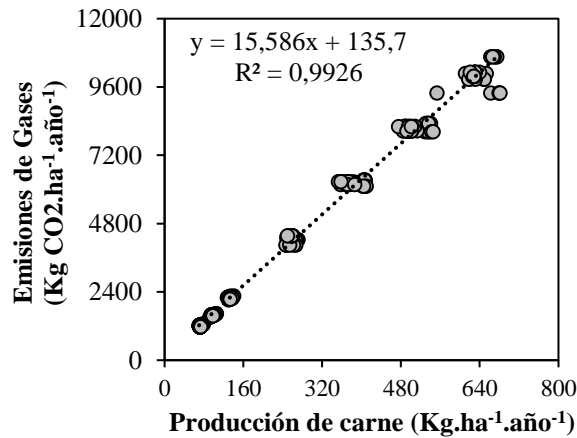


Figura 2.14: Relación entre producción de carne (Kg carne.ha⁻¹.año⁻¹) e Impacto ambiental evaluado en términos de emisión de gases por unidad de superficie (Kg CO₂eq.ha⁻¹) ($p < 0,05$).

Considerando que alrededor del 90% de las emisiones de metano son principalmente originadas por fermentación ruminal (Murray *et al.*, 1976), mejorar la disponibilidad de energía metabolizable de la dieta puede mejorar la eficiencia del proceso productivo en términos de intensidad de las emisiones (kg CO₂ equivalente por kilogramo producido) (White *et al.*, 2010; Cardoso *et al.*, 2016; Barretto *et al.*, 2013; Oliveira Silva *et al.*, 2016). En los sistemas de cría pastoriles, mejorar la eficiencia de utilización de las pasturas es uno de los aspectos claves para incrementar la producción de carne y reducir al mismo tiempo las emisiones por hectárea (Becoña *et al.*, 2014; Herrero *et al.*, 2013). Finster (2007), además señala que el suministro de dietas con un correcto balance de energía, proteína y el uso más eficiente del forraje a través de un mejor manejo del pastoreo contribuiría a reducir las emisiones de óxido nitroso desde el suelo.

La elección del indicador utilizado para cuantificar e informar la emisión de gases desde el sector ganadero es esencial para evaluar tanto las estrategias de mitigación como aquellos sistemas de producción que no incentiven las emisiones (Crosson *et al.*, 2011). Muchos de los métodos de mitigación que permiten reducir las emisiones de GEI por animal o unidad de producto, generan incrementos en las emisiones por unidad de superficie (del Prado *et al.*, 2010; Garnett *et al.*, 2010). En este sentido, el presente estudio remarca que si bien la intensificación de los sistemas pastoriles, puede ser una estrategia que contribuya al ordenamiento territorial desde el paradigma de *land sparing*, no siempre se encuentra asociada a mejores valores de eficiencia (Basset *et al.* 2009). Los resultados obtenidos son coincidentes con otros autores (Waugh *et al.*, 2005; White *et al.*, 2010; Foley *et al.*, 2011, Crosson *et al.*, 2011; Fernández Rosso *et al.*, 2018). Mediante la utilización del modelo de simulación (Nasca *et al.*, 2015) fue posible cuantificar para sistemas ganaderos de cría del Chaco

semiárido tanto los valores absolutos de emisión ($\text{Kg CO}_2\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) cómo la composición de las emisiones (% de metano, óxido nitroso y dióxido de carbono) conforme se incrementaron los niveles de intensificación. Dichos valores, constituyen una base de información regional sobre la cual discutir/evaluar estrategias de mitigación. Finalmente, cabe mencionar que a pesar de la importante contribución que realiza la cuantificación de las emisiones GEI a la comprensión y mitigación de la problemática del cambio climático, aún falta mayor reconocimiento de la función que desempeñan los sistemas ganaderos bovinos pastoriles en el almacenamiento de carbono, la protección de la biodiversidad y la utilización de tierras marginales que no pueden utilizarse para cultivos.

2.6. Conclusiones

Bajo las condiciones de análisis establecidas la intensificación de los sistemas de cría evaluados impacta de la siguiente manera:

1. Niveles de intensificación crecientes mejoraron la producción de carne y el resultado económica de los sistemas de cría, aunque en este último caso por encima de 1000 Kg de carga animal los incrementos fueron decrecientes.
2. La emisión de gases de efecto invernadero por unidad de superficie ($\text{CO}_2 \text{ eq}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) se asoció positivamente a la intensificación por efecto de la carga animal y la mayor utilización de insumos externos.

Estos resultados tuvieron una tendencia similar en las tres localidades estudiadas. Por otro lado, la localidad con menor precipitación media anual expresó mayor requerimiento de forrajes conservados y suplementación, afectando de manera más acentuada el margen bruto del sistema en relación a las otras dos localidades. Al mismo tiempo, debido al mayor déficit en la oferta de forraje y mayor necesidad de incorporar alimentos al sistema, más insumos fueron necesarios para incrementar la producción, asociándose dicha variable a un mayor consumo de energía fósil en el sistema. Considerando las características climáticas diferenciales entre las localidades evaluadas, se destaca la potencialidad de la región como productora de carne, así como también algunos de los costos ambientales que conlleva la intensificación de la ganadería en la región.

Capítulo experimental 3:

Impacto de la intensificación ganadera sobre la estabilidad de los sistemas de cría del Chaco semi-árido

3. Impacto de la intensificación ganadera sobre la estabilidad de los sistemas de cría del Chaco semiárido

3.1. Introducción

Las regiones semiáridas en general presentan características únicas que las enfrentan al desafío de incrementar la productividad al mismo tiempo que disminuir la vulnerabilidad al ambiente (Sietz *et al.*, 2011). En este sentido, la variabilidad en las precipitaciones puede generar un fuerte impacto sobre los sistemas ganaderos pastoriles afectando la producción del forraje (Deshmukh 1984; Le Houerou *et al.*, 1988) y en consecuencia la producción de carne (O'Reagain *et al.*, 2011). Tradicionalmente, los sistemas ganaderos mejor adaptados a la variabilidad climática de los ambientes semiáridos fueron los de condiciones extensivas (Robinson *et al.*, 2015), sin embargo, la tendencia actual de los sistemas pastoriles se dirige hacia la intensificación ganadera (Thornton *et al.*, 2009). Particularmente en el Chaco semiárido, dadas las características climáticas de la región, es necesario prestar atención a las nuevas estrategias de producción con el objetivo de explorar si realmente contribuyen a desarrollar sistemas más productivos, y al mismo tiempo más estables. En términos generales, la estabilidad es la constancia de la productividad del sistema en el tiempo frente a oscilaciones de clima, precio, mercado (Conway, 1987; Marten, 1988) o expresado a su inversa, es una medida de la variabilidad del sistema (Grimm *et al.*, 1992). Al igual que la eficiencia, la estabilidad también es considerada una propiedad emergente del sistema (Conway, 1987), y como tal puede ser abordada de manera multidimensional. En este estudio, se analizará la estabilidad de los sistemas de cría bovina del Chaco semiárido principalmente en términos productivos, considerando que la variabilidad puede verse reflejada no solamente en las precipitaciones, sino también en distintos niveles (variabilidad en la producción de las pasturas; variabilidad en el resultado productivo).

3.1.1. Variabilidad en las precipitaciones

Los sistemas de producción que dependen en gran medida de las precipitaciones para el crecimiento de los cultivos agrícolas o de las pasturas, inevitablemente ven reflejado en los niveles de producción la variabilidad en las precipitaciones (Cooper *et al.*, 2008). Esta característica es particularmente acentuada en la región del Chaco semiárido, donde la variabilidad estacional e interanual de las precipitaciones es una de las principales fuentes de inestabilidad en los sistemas de cría bovina. En este contexto, los productores agropecuarios despliegan una variedad de estrategias para enfrentar las variaciones ambientales y productivas con el fin de estabilizar sus resultados económicos y reducir riesgos (Strizler, 2007; Diaz Solís, 2009). Con el objetivo de describir la variabilidad en las precipitaciones que caracteriza a diferentes localidades de la región del Chaco semiárido, se realizó una

sistematización de registros históricos obtenidos a través del Instituto de Clima y agua – INTA Castelar, el Servicio Meteorológico Nacional, Bolsa de Cereales de Córdoba y el portal de datos meteorológicos de EEA-INTA Santiago del Estero (<http://santiago.inta.gov.ar/meteo/>). Se recopiló información de 45 localidades, correspondientes a las provincias de Tucumán, Santiago del Estero, Catamarca, Salta, Formosa, Chaco y norte de Córdoba (Cuadro x). Al analizar los registros históricos de las precipitaciones, se observa que la variabilidad interanual de las mismas aumenta a medida que uno se mueve de lugares más húmedos a semiáridos (Figura 3.1). En este estudio, precipitaciones superiores a 800 mm anuales corresponden a dos amplias fajas que limitan el Chaco Semiárido: la oriental se apoya en el límite con el Chaco Húmedo y la occidental es el borde pedemontano donde se mezcla con los bosques de Jujuy y Salta y la Ecorregión de las Yungas en Tucumán (Morello, 2012). Los valores observados expresan el carácter errático de las precipitaciones en la región y resaltan la importancia de estudiar el impacto de esta variable sobre la estabilidad de los sistemas de cría. En otras regiones semiáridas del mundo, tal es el caso del este y sudeste de África observaron una tendencia similar, ante un rango de precipitaciones que varió entre 250 y 600 milímetros por año (Cooper et al., 2008).

Cuadro 3.1: Registros históricos de precipitación ($\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$) y su coeficiente de variación (CV) de 45 localidades del Chaco semiárido, correspondientes a las provincias de Tucumán, Santiago del Estero, Catamarca, Salta, Formosa, Chaco y norte de Córdoba. Fuente: Instituto de Clima y agua – INTA Castelar; Servicio Meteorológico Nacional; Bolsa de Cereales de Córdoba; Portal de datos EEA-INTA Santiago del Estero (<http://santiago.inta.gov.ar/meteo/>).

| Provincia | Localidad | serie | Precipitación media histórica | CV |
|---------------------|------------------------|-----------|-------------------------------|------|
| Tucumán | Leales | 1928-2016 | 845,0 | 25,9 |
| Santiago del Estero | Las Cejas | 1935-1990 | 694,4 | 31,6 |
| Tucumán | Cañete | 1974-1990 | 849,9 | 22,8 |
| Córdoba | El brete | 1982-2002 | 663,0 | 29,5 |
| Tucumán | Colombres | 1935-2002 | 901,0 | 27,7 |
| Tucumán | Benjamin Paz | 1935-1990 | 442,0 | 23,5 |
| Santiago del Estero | Capital - EEA La María | 1981-2015 | 612,6 | 26,1 |
| Santiago del Estero | San Pedro | 1916-2014 | 488,3 | 33,1 |
| Santiago del Estero | Campo Gallo | 1925-2014 | 643,6 | 27,7 |
| Santiago del Estero | Pinto | 1975-2014 | 719,1 | 26,1 |
| Santiago del Estero | Sumanpa | 1934-2014 | 532,1 | 34,5 |
| Santiago del Estero | Pozo Hondo | 1916-2014 | 604,5 | 32,3 |
| Santiago del Estero | Isca Yacu | 1916-1989 | 577,2 | 29,1 |
| Santiago del Estero | Quimili | 1918-2012 | 685,8 | 34,8 |
| Santiago del Estero | Otumpa | 1919-1934 | 635,8 | 28,0 |
| Santiago del Estero | Tintina | 1923-2014 | 655,8 | 31,9 |

| | | | | |
|---------------------|--------------------------|-----------|--------|------|
| Santiago del Estero | Fortín Inca | 1912-1996 | 801,5 | 28,2 |
| Santiago del Estero | Monte Quemado | 1968-2014 | 696,7 | 33,6 |
| Santiago del Estero | Nueva Esperanza | 1927-2016 | 618,5 | 36,3 |
| Santiago del Estero | Ojo de agua | 1970-2016 | 582,7 | 38,1 |
| Santiago del Estero | Vilelas | 1912-1997 | 663,7 | 30,3 |
| Santiago del Estero | Malbrán | 1922-2013 | 741,9 | 28,6 |
| Santiago del Estero | Santos lugares | 1982-2013 | 638,3 | 22,6 |
| Salta | Las lajitas | 1949-1990 | 734,7 | 36,0 |
| Salta | Coronel Mollinedo | 1949-2002 | 912,0 | 26,9 |
| Salta | Tolloche | 1934-2003 | 607,1 | 35,3 |
| Salta | Metán | 1934-1990 | 901,0 | 28,7 |
| Salta | EL Galpón | 1934-1990 | 548,0 | 27,8 |
| Salta | Pichanal | 1934-1990 | 667,0 | 34,0 |
| Salta | Oran | | 1085,0 | 17,6 |
| Salta | Tartagal | 1975-1987 | 983,0 | 21,9 |
| Salta | Capitan Page j. | 1938-1977 | 544,0 | 35,3 |
| Salta | coronel moldes | 1935-1976 | 429,0 | 26,3 |
| Salta | coronel cornejo | 1934-1990 | 787,0 | 29,9 |
| Salta | Las lomas | 1934-1990 | 768,3 | 32,7 |
| Formosa | Tte. Gral. Fraga | 1938-1990 | 576,6 | 30,8 |
| Formosa | Ing. Juarez | 1936-1990 | 560,5 | 32,4 |
| Formosa | Las lomas | 1971-2016 | 1004,0 | 13,6 |
| Chaco | Las breñas | 1938-1988 | 943,0 | 23,7 |
| Chaco | Gancedo | 1934-1977 | 832,9 | 24,3 |
| Chaco | Taco pozo | 1934-1990 | 560,9 | 34,9 |
| Córdoba | Villa Maria del Rio seco | 2008-2016 | 594,7 | 23,3 |
| Córdoba | Eufrasio Loza | 2008-2017 | 586,2 | 22,0 |
| Catamarca | Recreo | 1980-2006 | 424,0 | 33,0 |
| Catamarca | Catamarca | 1962-1989 | 394,0 | 29,9 |

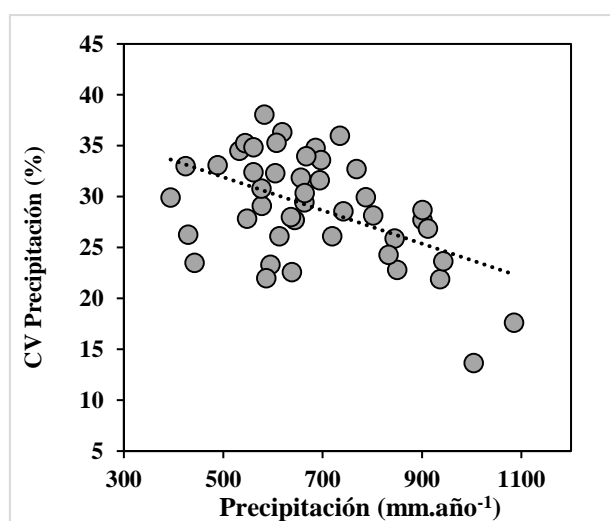


Figura 3.1: Relación entre la precipitación media anual y su coeficiente de variación (CV) expresado en porcentaje para distintas localidades del Chaco semiárido argentino.

3.1.2. Variabilidad en la producción de las pasturas

La variabilidad en la producción de las pasturas se encuentra fuertemente asociada con la estabilidad del sistema (Elton, 1958). Mientras que la producción anual de las pasturas es una medida del funcionamiento general del sistema (Fahey y Knapp, 2007), su variabilidad es un indicador de cómo responde esta variable, por ejemplo, frente a fluctuaciones en las precipitaciones (Swemmer *et al.*, 2007). Varios estudios demuestran que la producción de forraje se encuentra ligada a la estacionalidad y variabilidad de las precipitaciones (Knapp *et al.*, 2006; Swemmer *et al.*, 2007; Camberlin *et al.*, 2009; Baeza *et al.*, 2010) por lo que en general, la precipitación suele ser aceptada como un buen estimador de la disponibilidad de agua (Rosenzweig 1968; Noy-Meir 1973; Sala *et al.* 1988; Paruelo y Lauenroth 1999). En términos generales, la producción media de las pasturas aumenta con la precipitación media anual (Walter 1977, Sala *et al.* 1988, Del Grosso *et al.* 2008) aunque existe un comportamiento diferencial a nivel espacial (entre sitios a escala regional) y temporal (distintos años para un mismo sitio) (Lauenroth y Sala, 1992).

En los ambientes semiáridos y subtropicales, una estrategia generalmente utilizada para intensificar la producción de los sistemas ganaderos consiste en reemplazar pastizales naturales por pasturas implantadas con el objetivo de incrementar la producción y calidad del forraje ofrecido (Dias-Filho, 2007; Ospina *et al.*, 2012), así como también la cantidad de alimentos producidos en forma de forrajes conservados (White *et al.*, 2010). Esta práctica, se encuentra a su vez asociado, a una mayor utilización de insumos externos (Viglizzo *et al.*, 2003). Considerando que en la región del Chaco semiárido la principal actividad ganadera es la cría bovina extensiva y siendo las pasturas implantadas y pastizales naturales la base de su alimentación (Pérez, 1992), es de interés evaluar cómo la variabilidad en las precipitaciones afecta los recursos forrajeros, y cómo dicha relación puede afectar la estabilidad de la carga animal de los sistemas.

3.1.3. Variabilidad en la producción de carne

La variación anual e interanual que experimenta la oferta de forraje (O'Reagain *et al.*, 2011) y la calidad de las pasturas (Clutton-Brock *et al.*, 1992; Scoones, 1993; Illius y O'Connor, 1999) afecta la capacidad de carga de los sistemas pastoriles. La incertidumbre en relación a la oferta de forraje debido a la variación en las tasas de crecimiento de las pasturas entre años y dentro del año es un desafío para los productores, quienes responden ante este escenario mediante determinadas estrategias de manejo, tales como la elección de la carga animal, la época de servicio y el momento de destete, con el objetivo de sincronizar la oferta de forraje y los requerimientos del rodeo (Kothmann and Smith, 1983; Doren *et al.*, 1985; White *et al.*, 2010). En general, el momento para ajustar la carga animal de los sistemas es cuando se termina la temporada de crecimiento de las pasturas y la

probabilidad de lluvias en los próximos meses es baja (Orr *et al.*, 1993). Por otro lado, la variabilidad estacional de la calidad de las pasturas puede afectar el consumo de nutrientes y energía (Owen-Smith, 2007), y desestabilizar la relación entre producción de forraje y la carga animal (Ellis y Swift 1988; Clutton-Brock *et al.*, 1997; Scoones, 1992; Illius y O'Connor, 1999). Si bien existe una gran diversidad de estrategias en relación con la elección de la carga animal, por lo general la decisión de una carga baja pretende asegurar que la cantidad de forraje a utilizar sea acorde al crecimiento anual de la pastura que se espera alcanzar en la mayoría de los años (ej. 70 % de los años) (Johnston *et al.* 2000). Por el contrario, cargas altas presentan la ventaja de poder aprovechar el forraje producido en buenos años climáticos (precipitación anual superior a la media) (O'Reagain *et al.*, 2011). Sin embargo, la producción en un año determinado, depende no solo de las condiciones ambientales y decisiones de ese año, sino también de los años anteriores (Romera *et al.* 2004). Distintas estrategias de manejo pueden desarrollarse para enfrentar el desafío de la variabilidad climática (Danckwerts *et al.* 1993) y la oferta de forraje (White *et al.*, 2010), siendo la incorporación de los silajes planta entera una de las estrategias que los productores cada vez adoptan con mayor frecuencia.

3.1.4. Impacto del silaje en la estabilidad del sistema

La utilización de forrajes conservados, y principalmente la confección de silajes planta entera, representan un elemento clave en rumiantes para incrementar la producción de manera eficiente (Bal *et al.* 1997, Jensen *et al.* 2005, Cone *et al.* 2008; Vanlauwe *et al.*, 2014, Khan *et al.* 2015). Si bien en los sistemas lecheros la incorporación del silaje planta entera se ha consolidado como una práctica estándar dentro de los esquemas de alimentación desde hace muchos años (White *et al.*, 2010), en los sistemas de carne su utilización es más reciente debido a la necesidad actual de intensificar los planteos de producción. La elección del silaje como forraje conservado se debe fundamentalmente al aporte que realiza a nivel energético y de digestibilidad (Ericsson y Nilsson 2006, Seleiman *et al.* 2013), permitiendo atenuar la variabilidad estacional en la calidad de las pasturas megatérmicas y favoreciendo la ganancia de peso vivo y condición corporal de los animales (Cook *et al.*, 1996; Waugh *et al.*, 2005; Owen-Smith, 2007). Sin embargo, los silajes de planta entera (e.g. de maíz) se caracterizan por ser deficientes a nivel proteico (Mosqueda y González, 1998; Hernández-Mendo y Leaver, 2004). Por tal motivo, son fundamentalmente utilizados por su valor energético.

A nivel de región, muchas de las estrategias de manejo que actualmente se están implementando para enfrentar la variabilidad climática (e.g. henuficación, silajes) han sido evaluadas a escala experimental y en el corto plazo, enfatizando principalmente el manejo de la carga en sí misma y no el manejo de la carga en función de la variabilidad de las precipitaciones o la producción de forrajes

en ambientes complejos y variables (O'reagain *et al*, 2009), cuando en realidad es esperable que la variabilidad del flujo de entrada de energía desde los productores primarios repercuta sobre la productividad y componentes del siguiente nivel trófico (Irisarri, 2012). Este capítulo representa un esfuerzo para explorar el impacto que genera la intensificación sobre la estabilidad de los sistemas de cría bovina en el mediano y largo plazo. La estabilidad de los sistemas se analizará a través de la variabilidad de la producción de forraje, la carga animal y la producción de carne.

3.2. Hipótesis

Este capítulo se basa en dos hipótesis:

1. La intensificación en términos de incremento en la carga animal de los sistemas pastoriles puros se da en detrimento de la estabilidad productiva del sistema. La producción de sistemas con mayor grado de intensificación es más variable debido al efecto que produce la variabilidad en las precipitaciones y producción de forraje característica de regiones semiáridas.

2. La incorporación de silaje de maíz como estrategia de alimentación en los sistemas de cría bovina del Chaco semiárido permite reducir la variabilidad estacional en la cantidad y calidad de forraje lo cual se traduce en un aumento de la ganancia de peso vivo del ganado e incrementa la estabilidad de los sistemas con inclusión de silaje de maíz en comparación a los sistemas de cría pastoriles puros.

3.3. Objetivos

El objetivo general de este capítulo es evaluar la estabilidad de los sistemas de cría bovina del Chaco semiárido frente a distintos niveles de intensificación a partir de información generada mediante un modelo de simulación y sistemas reales de producción.

A continuación, se presentan los objetivos específicos de este capítulo:

1. Relacionar los coeficientes de variación interanual de las precipitaciones y la producción de forraje en distintas localidades de la región.
2. Relacionar los coeficientes de variación interanual de la producción de forraje y la carga animal para distintos sistemas pastoriles de cría de la región.
3. Relacionar los coeficientes de variación interanual de la carga animal y de la precipitación anual a nivel de sistema de producción.

4. Comparar las relaciones entre la carga animal y la producción de carne por unidad de superficie en sistemas con niveles de intensificación creciente.

3.4. Materiales y métodos

En base al objetivo general de este capítulo, el estudio se llevó adelante en la región del Chaco semiárido argentino. Las evaluaciones se realizaron a nivel de sistema de producción considerando sistemas pastoriles (SP) a aquellos que basan la alimentación de la vaca de cría exclusivamente sobre pasturas, y sistemas intensificados (SI) a aquellos que incluyeron silaje de maíz planta entera en su estrategia de alimentación. En ambos casos, la recría de las vaquillonas fue pastoril con suplementación. Tanto para SP como SI, los niveles crecientes de intensificación fueron definidos en función de la carga animal ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$), la cantidad de alimentos producidos en forma de forrajes, la incorporación de silaje y la utilización de insumos externos. Para comparar la variación interanual de la producción de forraje, la carga animal y la producción de carne se incorporaron tanto sistemas simulados como sistemas reales ubicados en distintas localidades de la región. En la figura 3.2 puede observarse la distribución geográfica de los sitios de estudio junto con la descripción del valor de precipitación en base a una media histórica y la variabilidad interanual de los mismos (CV). Para el análisis de los sistemas reales de producción se contaba con registros de más de 10 años de datos de precipitación, carga animal y producción de carne. En relación con los sistemas de cría simulados, los mismos fueron obtenidos a través del modelo desarrollado por Nasca *et al.* (2015) para los distintos escenarios de intensificación propuestos en el capítulo III de esta tesis (Cuadro 2.2). En este caso, los datos climáticos utilizados correspondieron a series históricas de precipitación dónde la estabilidad fue evaluada estableciendo un período de simulación de 50 años como ventana de análisis. El objetivo de incorporar las simulaciones fue explorar el posible comportamiento de niveles de intensificación aún no utilizados en la región.

| Localidad | Precipitación (mm.año ⁻¹) | CV (%) |
|------------------|--|-----------|
| Leales | 845 | 28 |
| Las Cejas | 569 | 29 |
| Taco ralo | 412 | 33 |
| Burruyacu | 629 | 29 |
| El Palomar | 572 | 30 |
| Recreo | 421 | 33 |
| Santiago del Est | 612 | 26 |
| Quimilí | 690 | 35 |
| Nueva esperanza | 619 | 36 |
| Isca yacu | 577 | 29 |
| Pozo betbeder | 598 | 31 |
| Pozo Hondo | 605 | 32 |

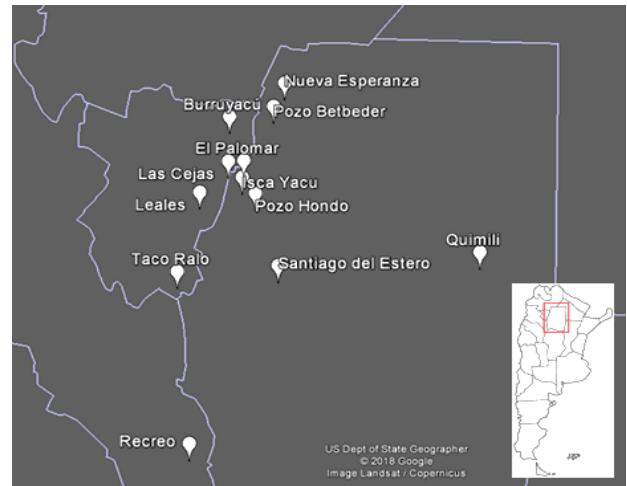


Figura 3.2: Listado de las localidades consideradas en el estudio, con su respectivo valor de precipitación media histórica (mm.año⁻¹) y coeficiente de variación expresado en porcentaje. Ubicación geográfica de los 12 sitios de estudio considerados.

3.4.1. Diseño Experimental

El estudio de la estabilidad de los sistemas de cría del Chaco semiárido fue abordado considerando distintas fuentes de variación que pueden afectar los resultados de productividad de la empresa agropecuaria, tales como a) variabilidad en las precipitaciones, b) variabilidad en la oferta de forrajes, c) variabilidad en la carga animal y cómo repercuten estas tres variables en el comportamiento del sistema en términos de producción de carne por hectárea. Se utilizó el coeficiente de variación (CV) de dichas variables como indicador principal. Para evaluar la variabilidad en las precipitaciones se recurrió a distintas fuentes de datos y estaciones meteorológicas (INTA Santiago del Estero; INTA-IIACS). Las localidades seleccionadas presentaron valores medios de precipitación anual entre 412 y 845 mm. En ambos casos (Sistemas pastoriles –SP- y sistemas intensivos –SI-), los datos de producción de forraje fueron obtenidos mediante el uso de un modelo de crecimiento de las pasturas (McCall y Bishop-Hurley, 2003) incorporado en el modelo de simulación ganadero desarrollado por Nasca et al (2015) calibrado y evaluado para la región. La variabilidad en la carga animal se obtuvo, al igual que en el caso anterior, mediante simulación y recopilación de información histórica de establecimientos ganaderos de la zona.

Para analizar las relaciones existentes entre la variabilidad de la precipitación, producción de forraje, carga animal y producción de carne se realizaron análisis de regresión lineal simple. Las comparaciones de la variabilidad en la carga animal entre sistemas pastoriles e intensivos, se llevó

adelante el método estadístico ANAVA (Infostat; Di Rienzo *et al.*, 2017). La normalidad de los residuos fue evaluada mediante gráficos Q-Q plot y estadísticamente mediante la prueba de Shapiro–Wilk. La homocedasticidad fue probada subjetivamente a través de gráficos de dispersión (residuos vs. Predichos). Las medias de los tratamientos fueron comparadas mediante la prueba de Tukey, y las diferencias significativas fueron declaradas cuando $P < 0,05$.

3.5. Resultados

3.5.1. Variabilidad en las precipitaciones y oferta de forraje

Los resultados que se presentan a continuación hacen referencia al impacto de la variabilidad (espacial y temporal) de las precipitaciones sobre el forraje disponible de los sitios de estudio analizados. La relación entre ambas variables presentó una tendencia lineal, en dónde se observó que la precipitación en mm.año^{-1} explicó el 52% de los resultados obtenidos, mientras que el coeficiente de variación de las precipitaciones demostró un menor ajuste explicando un 43% de la variabilidad en el forraje (Figura 3.3).

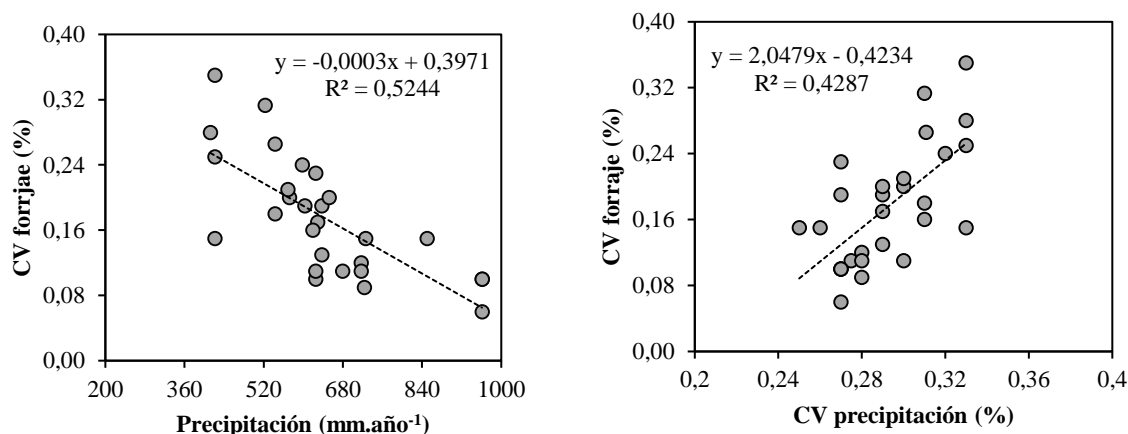


Figura 3.3: Relación entre la precipitación (mm.año^{-1}) y el coeficiente de variación (CV%) del forraje y entre el coeficiente de variación (CV%) del forraje y las precipitaciones para las distintas localidades y sistemas de cría analizados de la región del Chaco semiárido argentino.

Cómo se mencionara anteriormente (Cooper *et al.*, 2008), mayores valores de precipitación (mm.año^{-1}) se encuentran asociados a menores valores de coeficiente de variación para dicha variable. De manera análoga, a medida que se incrementaron las lluvias (mm.año^{-1}), disminuyó el coeficiente de variación en la oferta de forraje. La menor variabilidad de las precipitaciones también estuvo asociada a una menor variabilidad en la oferta de forraje. Estudios anteriores determinaron una relación

lineal entre producción de pasturas y precipitación en distintos lugares del mundo (Lauenroth *et al.*, 1992; Lane *et al.*, 1998; O'Connor *et al.*, 2001; Knapp *et al.*, 2006). Ospina *et al.* (2012) encontraron relaciones significativas lineales y cuadráticas entre la producción de las pasturas y la precipitación ($r^2=0.74$ en especies implantadas y $r^2=0.47$ en pastizales naturales). Por otro lado, Paruelo y Lauenroth (1999) y Fang *et al.* (2001) encontraron una relación positiva entre el coeficiente de variación interanual de un estimador de la producción primaria neta aérea (PPNA)² y el coeficiente de variación de la lluvia a escala regional. A su vez, Paruelo y Lauenroth (1999) observaron que el coeficiente de variación de la PPNA fue menor al de la lluvia. Sin embargo, Knapp y Smith (2001) encontraron que la variabilidad (CV) de la producción de forraje no estaba asociada con la variabilidad (CV) de la precipitación a lo largo de un amplio gradiente regional.

Si bien las precipitaciones definidas tanto a nivel espacial como temporal generan un fuerte impacto sobre la producción de las pasturas (Fynn y O'Connor, 2000), existen otros factores que pueden estar afectando simultáneamente tales como la variación interanual en el número de días de precipitación (Morón *et al.*, 2007), y la distribución de las mismas durante el ciclo de crecimiento (Marengo *et al.*, 2001). En relación a este último punto (distribución estacional de las precipitaciones), debido a que el régimen de precipitaciones en la región del Chaco semiárido es de tipo monzónico, las localidades estudiadas concentran el período de lluvias principalmente en época estival, donde las precipitaciones entre Diciembre y Marzo resultan fundamentales para el funcionamiento de los sistemas ganaderos. Particularmente el mes de diciembre, es considerado un mes clave para el crecimiento de las pasturas y la siembra de cultivos estivales con destino a silaje. En la figura 3.4, puede observarse la incidencia de las precipitaciones en época estival (Dic-Mar) sobre la producción de forraje para las localidades de Isca yacu (577 mm.año^{-1}) y Leales (845 mm.año^{-1}). Los puntos representan diferentes años para cada sitio de estudio ($n=50$ para cada sitio). Los resultados fueron obtenidos mediante el modelo de simulación desarrollado por Nasca *et al.* (2015) contemplando una carga animal baja equivalente a $175 \text{ KgPV.ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$. Si bien en ambos casos la regresión lineal fue significativa ($p<0,05$), en Isca yacu la pendiente de la recta fue superior a Leales, indicando que la respuesta a la precipitación fue mayor. La precipitación acumulada entre los meses de Diciembre a Marzo explicó alrededor del 42% de los resultados obtenidos en las dos localidades evaluadas.

² La PPNA es la tasa de creación de nueva biomasa vegetal aérea por unidad de área y tiempo y, por lo tanto, es una medida directa de la generación de energía disponible para los herbívoros. Es la tasa de acumulación de biomasa en un determinado período de tiempo (Irisarri, 2012).

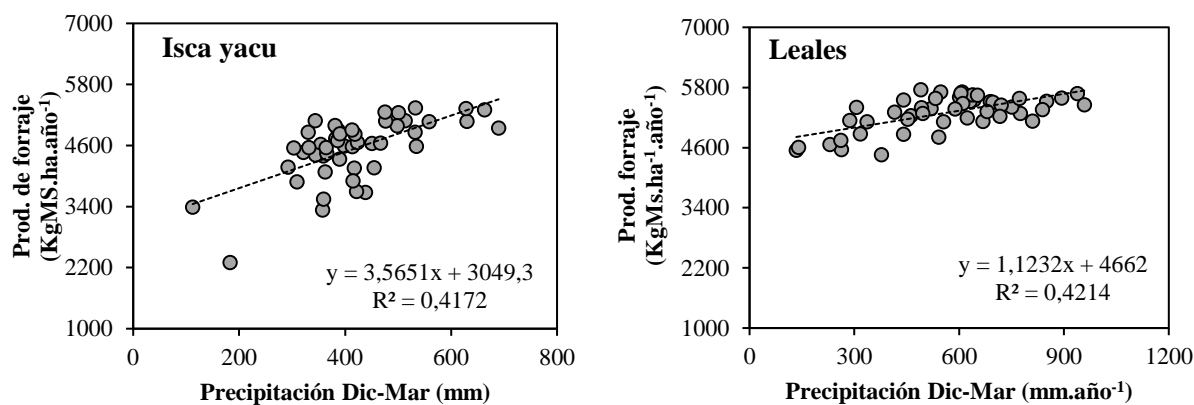


Figura 3.4: Relación entre la precipitación acumulada entre el mes de Diciembre y Marzo ($\text{mm}\cdot\text{año}^{-1}$) y la producción de forraje ($\text{KgMS}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) para los distintos sistemas pastoriles de cría de las localidades de Isca yacu y Leales ($p < 0.05$).

3.5.2. Variabilidad en la producción de forraje y carga animal

Para analizar las relaciones entre la producción de las pasturas y la carga animal se hicieron dos tipos de análisis. En primer lugar, se estudió la incidencia de la variabilidad del forraje sobre la carga animal de los sistemas, y luego considerando que ambas variables se afectan mutuamente, se evaluó la incidencia de la carga animal sobre la producción de forraje.

3.5.2.1. Incidencia de la variabilidad del forraje sobre la carga animal de los sistemas

El coeficiente de variación interanual del forraje evaluado a nivel de sistema y bajo condiciones SP, para las distintas localidades estudiadas, se relacionó positivamente con el coeficiente de variación interanual de la carga animal. Mediante el análisis de regresión lineal, fue posible observar que la variabilidad en el forraje explicó alrededor del 40% ($p < 0.05$) de la variabilidad en la carga animal (Figura 3.5). Resultados similares obtuvieron otros autores al analizar las relaciones espaciales entre la carga animal y la producción de forraje (McNaughton *et al.* 1989, Oesterheld *et al.* 1992, Fritz & Duncan 1994, Irisarri, 2012). Además, Irisarri (2012) obtuvo que en la mayoría de los casos estudiados el CV de la carga animal no superó el valor de CV de la producción de forraje.

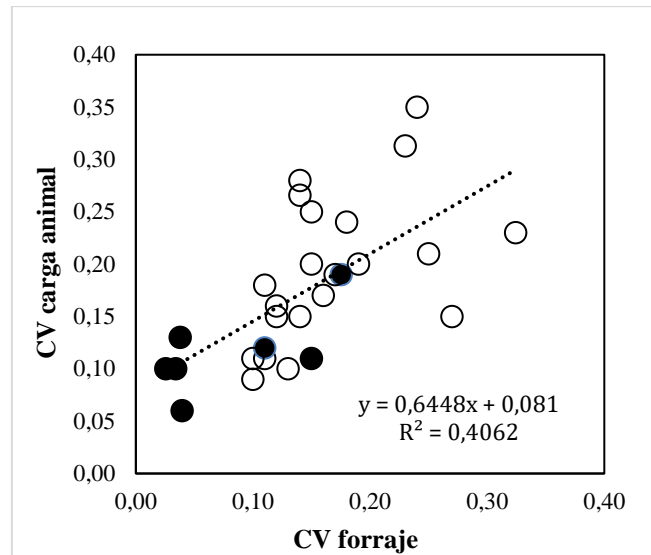


Figura 3.5: Relación entre la variabilidad interanual del forraje (CV) y el coeficiente de variación de la carga para los distintos sistemas pastoriles (SP) de cría utilizados en este estudio. Los puntos negros representan los sistemas simulados, los blancos sistemas reales de producción. La línea completa representa el ajuste del modelo de regresión lineal (valor $p < 0,05$).

Por otro lado, tal como se mencionara anteriormente (sección 1.5.1), si bien las precipitaciones ocurren principalmente en época estival, la mayor variabilidad en las precipitaciones dentro del año ocurre en los meses de invierno y primavera. En este sentido, es necesario destacar la influencia de estos valores sobre el comportamiento de los sistemas de cría bovina, principalmente a la salida de la primavera, ya que se relacionan con la recarga de agua en el perfil del suelo, donde variables como la precipitación y la temperatura son determinantes de la situación hídrica del suelo (Penman, 1948; Thornthwaite *et al.*, 1957) así como también con el final del período de partos y la recuperación posparto de los vientres (Romera, 2004). En general, un indicador muy utilizado en los sistemas ganaderos caracterizado por ser representativo de la relación entre la oferta de forraje y la demanda del rodeo, y también relacionado a la eficiencia reproductiva de los vientres, es la condición corporal³. Algunos autores describen un desfase entre la ocurrencia de las precipitaciones y la producción de biomasa, que afecta el cambio en la condición corporal del rodeo, siendo más sensible a la pérdida en la condición corporal el año posterior a la sequía, aun cuando después del año seco sigue un año de mayores precipitaciones (Diaz Solis *et al.*, 2009). Este comportamiento se observa en la Figura 3.6 En el segmento de la serie climática graficada, es posible observar la caída en el valor de condición

³La condición corporal es indicador definido en función del nivel de engrasamiento de los animales, y se encuentra correlacionada positivamente con la ganancia media diaria de peso vivo y el rendimiento (Gregory y Cundiff, 1980).

corporal de la vaca de cría de forma más acentuada en el sistema pastoril de mayor carga, y cómo la incorporación de silaje (SI), si bien no evita variaciones en la condición corporal, permite sostener en determinados momentos dicho parámetro.

La variación en la condición corporal (CV %) fue menor en el sistema con silaje (9.2 %) en relación a los pastoriles (14.65% y 15.14% para SP 1 y SP 2, respectivamente). Sin embargo, en la localidad de Leales (precipitación media anual 845 mm.año⁻¹), se contaba con datos reales históricos de condición corporal al destete tanto para sistemas intensificados (carga media anual 1092 Kg.ha⁻¹) como pastoriles (carga media anual 354 Kg.ha⁻¹), observándose que si bien la incorporación de silaje permitió mejorar la condición corporal (aproximadamente 1 punto en la escala 1-9), los sistemas intensificados expresaron un valor relativo superior de CV (19% y 16% para SI y SP, respectivamente).

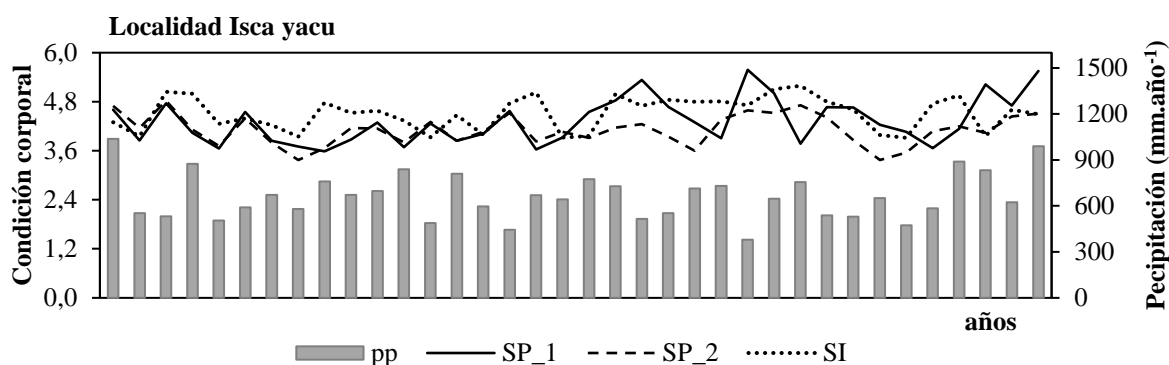


Figura 3.6: Evolución de la condición corporal en relación a las precipitaciones anuales en la localidad de Isca Yacu (precipitación media anual 577 mm.año⁻¹) bajo distintos niveles de intensificación (sistema pastoril: SP 1= carga 189 Kg.ha⁻¹.año⁻¹; SP 2= carga 257 Kg.ha⁻¹.año⁻¹; sistema intensivo: SI 733 Kg.ha⁻¹.año⁻¹). El valor de condición corporal corresponde al valor promedio anual en la escala 1-9. El valor de precipitación (pp) corresponde al valor anual expresado en milímetros.

3.5.2.2. Incidencia de la carga animal sobre la producción de forraje

Considerando que la respuesta de la producción de forraje no sólo depende de la precipitación anual sino también de años anteriores y del manejo que se haga del mismo (Romera, 2009), en este estudio se observó que en los sistemas pastoriles el forraje disponible para pastoreo directo varió considerablemente en el período de tiempo analizado y los niveles de carga seleccionados. A medida que se incrementó la carga animal, la variabilidad en la oferta de forraje disponible fue más acentuada, principalmente en las localidades con menor precipitación media anual (Figura 3.7).

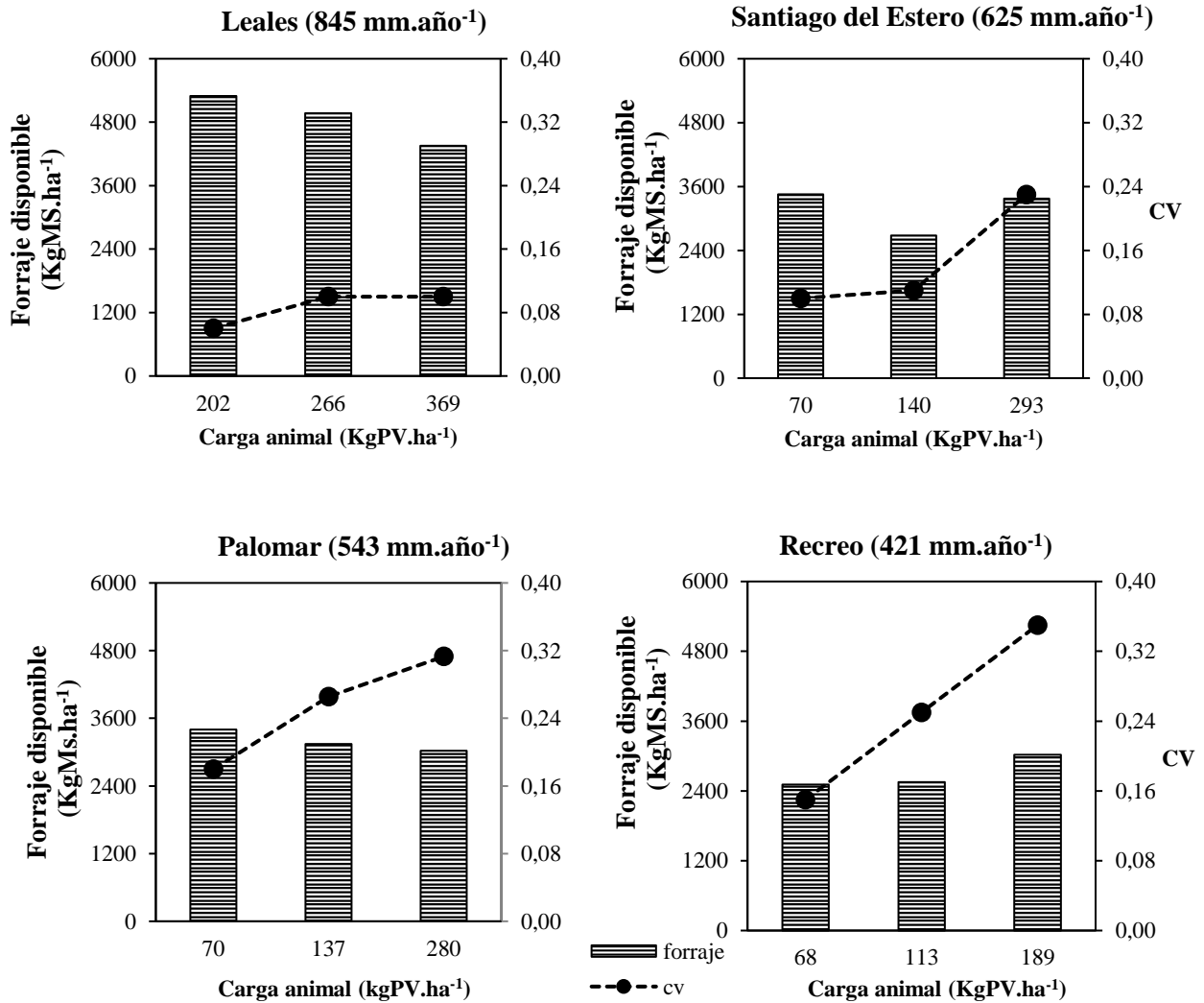


Figura 3.7: Relación entre el nivel de intensificación de sistemas pastoriles (Carga animal - KgPV.ha⁻¹), el forraje disponible (KgMs.ha⁻¹) y su variabilidad (CV) para las localidades de Leales, Santiago del estero, Palomar y Recreo. Los valores expresados son resultado promedio de 50 años de simulación para cada uno de los sistemas y localidades evaluados.

Estas diferencias pueden ser explicadas no solamente debido a un mayor consumo de forraje y días de pastoreo (Fynn y O’connor, 2000; Ash *et al.*, 2011), sino también al efecto negativo generado por la alta presión de pastoreo sobre el crecimiento de las pasturas, limitando su período de recuperación, principalmente en los años secos (Ash *et al.*, 2011). Por lo general, en años con precipitaciones menores a la media anual, la ocurrencia de sequías puede desencadenar condiciones de sobrepastoreo (McKeon *et al.* 2004), afectando la productividad de las pasturas y cobertura de suelo (Tothill and Gillies 1992). Frente a este escenario, la utilización de las reservas forrajeras desempeña una función estratégica. En la Figura 3.8 es posible observar la dinámica de las precipitaciones y el forraje disponible en la localidad de Isca yacu, conforme se incrementa el nivel de intensificación para el período de tiempo simulado, y como se ve afectado el consumo de silaje (número de días).

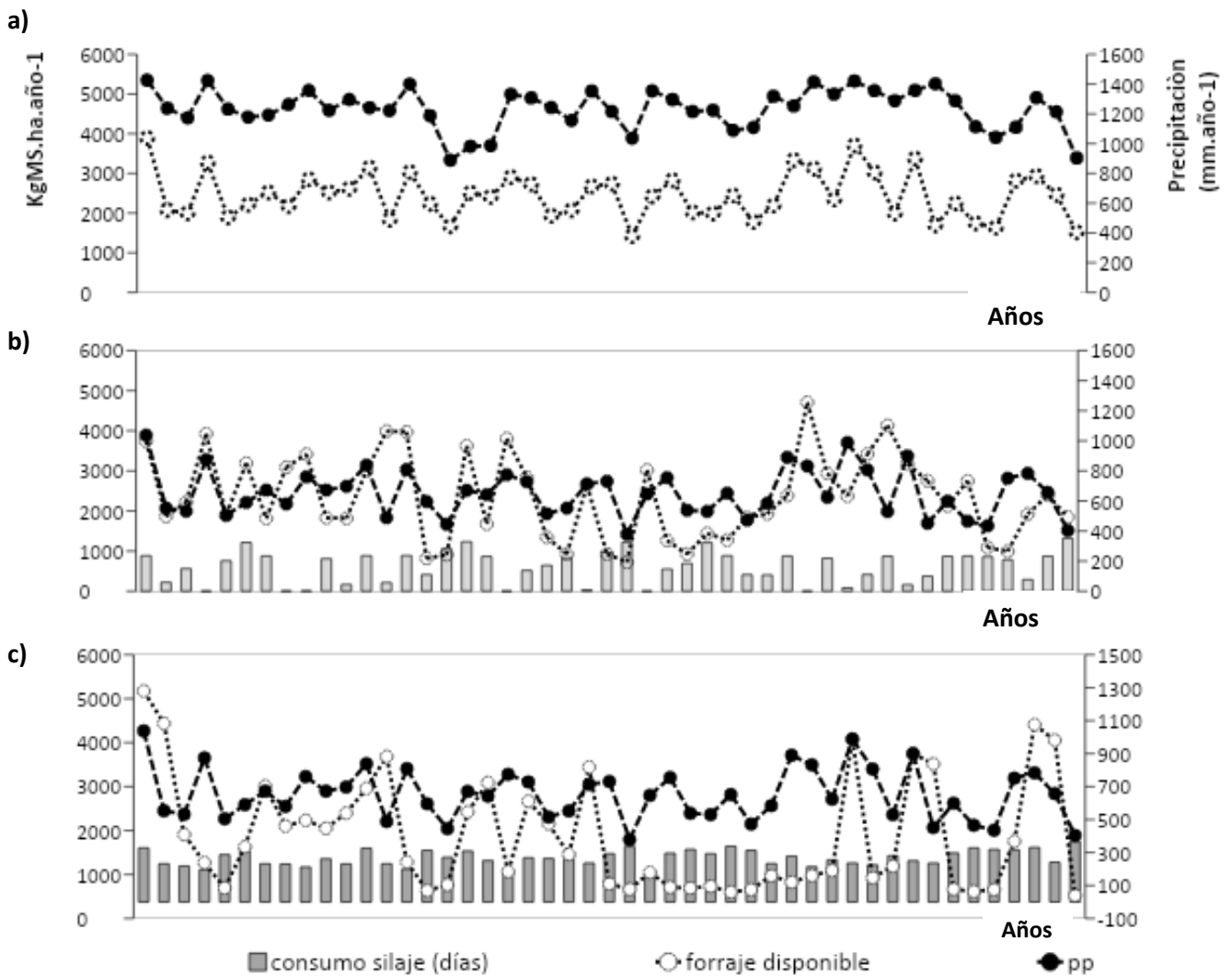


Figura 3.8: Impacto de la variabilidad en las precipitaciones (pp) sobre la producción de forraje para la Localidad de Isca yacu. Los resultados corresponden a sistemas de cría simulados frente a distintos niveles de carga animal: a) 189 KgPV.ha⁻¹.año⁻¹, b) 733 Kg.ha⁻¹.año⁻¹, c) 1790 Kg.ha⁻¹.año⁻¹. En el gráfico puede observarse además de la dinámica de las precipitaciones (mm.año⁻¹) y el forraje disponible (kgMs.ha.año⁻¹), la fluctuación en el consumo de silaje expresado en días.año⁻¹.

La relación entre el coeficiente de variación interanual de la carga animal y el coeficiente de variación interanual de la lluvia, puede ser tomada como una medida de la variabilidad de la producción forrajera (Irisarri, 2012). En la Figura 3.9 puede observarse la relación entre dichas variables, tanto para sistemas pastoriles como intensificados. El coeficiente de variación interanual de la carga animal no se relacionó con el coeficiente de variación interanual de las precipitaciones. Resultados similares fueron encontrados por Irisarri (2012) al evaluar el coeficiente de variación interanual de la carga animal y el coeficiente de variación interanual de la lluvia tanto en sistemas naturales como ganaderos. Además, Irisarri (2012) encontró que en la mayoría de los sistemas ganaderos, el

coeficiente de variación de la carga fue menor que el de la precipitación. Por otro lado, en sistemas de producción extensivos con precipitación media anual de 500 mm, Fynn y O'Connor (2000) y Angassa y Oba (2007) observaron una relación positiva no lineal entre la carga animal y la lluvia.

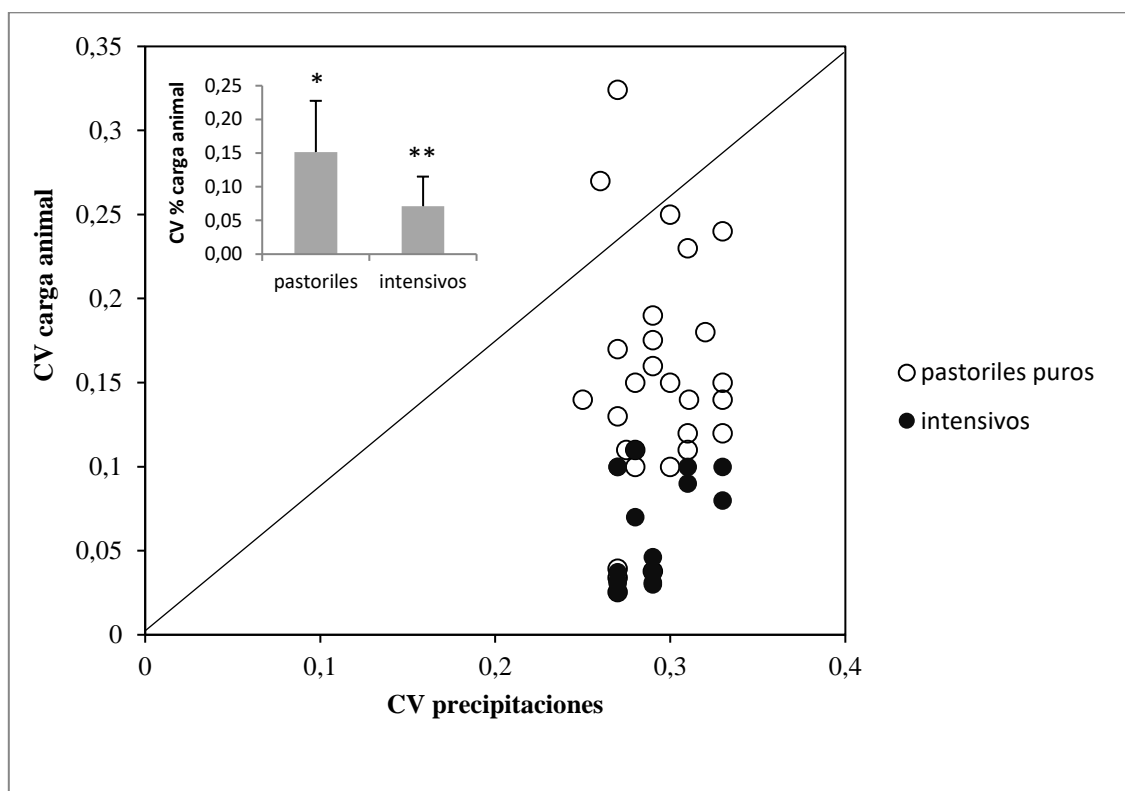


Figura 3.9: Relación entre la variación inter anual en la precipitación anual (CV) y la variación inter anual en la carga animal (CV). Se diferencian dos tipos de sistemas bovinos de cría: a) pastoriles, b) intensificados. El panel interno muestra los valores medios para el CV de la carga animal según los dos tipos de sistemas. Las barras indican el D.E. Los *,** indican diferencias significativas (Valor $p < 0,05$).

En los sistemas de producción evaluados, cuando estos se intensificaron por encima de una carga animal de $421 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ e incluyeron silaje de maíz en la dieta como estrategia de alimentación en la vaca de cría, expresaron un comportamiento más estable frente a la variabilidad climática, remarcando la importancia del silaje como un factor clave para sostener mayores niveles de carga animal en dichos períodos frente a variaciones en la oferta de las pasturas. La duración de la oferta de silaje a lo largo del ciclo ganadero (días) también varió en función del nivel de intensificación y localidad. En el cuadro 3.1 puede observarse para las localidades de Isca yacu ($577 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$) y Leales ($845 \text{ mm} \cdot \text{año}^{-1}$) tal como era de esperarse, a mayor nivel de intensificación se incrementaron

los días de utilización de silaje. Sin embargo, sostener la carga animal objetivo en los sistemas menos intensificados (entre 700 y 1100 Kg.ha⁻¹.año⁻¹) estuvo asociado a una mayor variabilidad con respecto al número de días en los cuales fue necesario la utilización de silaje. Estos valores sugieren que, ante la ocurrencia de años de escasas precipitaciones en los cuales la producción de forrajes (pasturas implantadas y silaje) se ve afectada negativamente, los sistemas tendieron a compensar este escenario de déficit en la alimentación a través del incremento en la cantidad de días con oferta de silaje. De este modo, sistemas de menor intensificación podrían alcanzar períodos de utilización de silaje similares a los observados en sistemas de cargas superiores (entre 1400 y 1790 Kg.ha⁻¹.año⁻¹).

Cuadro 3.2: Consumo de silaje (días de utilización) y coeficiente de variación (%) para los sistemas de cría bovina simulados en las localidades de Isca yacu y Leales. Los valores, tanto de la carga animal (Kg⁻¹.ha⁻¹.año⁻¹) como de los días de utilización de silaje, corresponden al promedio (media ± desvío estándar) de 50 años de simulación.

| | Carga animal (Kg.ha ⁻¹ .año ⁻¹) | Utilización (Días) | CV (%) |
|-----------|---|-----------------------|-----------|
| Isca Yacu | 733 | 162 ± 107 | 65,80 |
| | 1109 | 230 ± 71 | 31,01 |
| | 1455 | 254 ± 57 | 22,57 |
| | 1790 | 272 ± 47 | 17,52 |
| Leales | 737 | 112 ± 115 | 102,60 |
| | 1072 | 175 ± 90 | 51,26 |
| | 1415 | 226 ± 69 | 30,88 |
| | 1760 | 238 ± 54 | 22,74 |

3.5.3. Variabilidad en la carga animal y producción de carne

La carga animal expresada en términos de kg.ha⁻¹.año⁻¹ varió en función del nivel de intensificación, de la localidad y a lo largo del período de tiempo analizado. En la figura 3.10-a, se observa la relación entre la carga animal (kg.ha⁻¹.año⁻¹) y la variación interanual de la producción de carne de los sistemas de cría evaluados (CV). Por un lado, es posible observar que incrementos en la carga animal generaron incrementos en la variabilidad de la producción de carne. La regresión lineal explicó el 68% de los resultados en los sistemas pastoriles y el 76% en los sistemas intensificados. Sin embargo, el comportamiento de los sistemas intensificados expresó menor variabilidad en relación a los sistemas pastoriles. Esta situación expone claramente la incidencia del silaje como estrategia de alimentación en los sistemas de cría de la región, permitiendo no solamente intensificar los sistemas, sino también sostener mayores niveles de carga animal en el tiempo favoreciendo la estabilidad productiva de los sistemas. En la figura 3.10-b, además puede observarse la incidencia de la variabilidad

de la carga animal en la producción de carne, explicando alrededor del 90% de los resultados obtenidos.

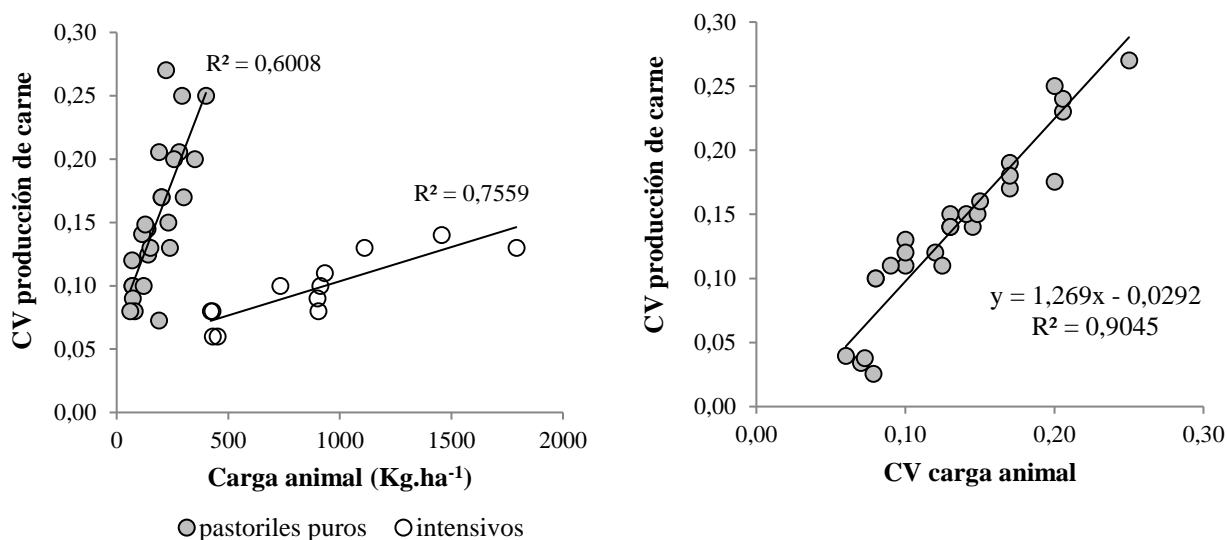


Figura 3.10: a) Relación entre la carga animal ($\text{kg ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$) y la variación inter anual en la producción de carne (CV). Se describen dos tipos de sistemas bovinos de cría: pastoriles e intensificados. Los mismos se diferencian significativamente en el CV de la producción de carne (Valor $p < 0,05$). **b)** Relación entre el coeficiente interanual de la carga animal ($\text{kg ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$) y la variación inter anual en la producción de carne de sistemas pastoriles puros (CV).

3.6. Conclusiones

Los resultados de este capítulo demuestran que existe una relación inversa entre la carga animal y la estabilidad productiva en sistemas de cría pastoriles puros. La precipitación media anual y la variabilidad interanual de las lluvias estuvieron relacionadas con la variabilidad en la producción de forraje, base principal de la alimentación de los rodeos de cría de la región. A su vez, a medida que los sistemas incrementaron la carga animal, se produjo un aumento en la variabilidad del forraje disponible, siendo esta respuesta más acentuada en los ambientes con mayor restricción de precipitaciones. Incrementos en la variabilidad interanual del forraje (CV forraje disponible), generaron aumentos en la variabilidad interanual de la carga animal. Los sistemas pastoriles puros fueron más variables en relación a aquellos que consumieron silaje. La carga animal de los sistemas pastoriles y su variabilidad temporal, se relacionó positivamente con la variación interanual de la producción de carne, afectando negativamente la estabilidad del sistema. Estos factores exponen la vulnerabilidad de los sistemas pastoriles frente a la variabilidad climática, expresando menor estabilidad en términos productivos ($\text{Kg carne}.\text{ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$) a medida que se intensificaron los sistemas. Los resultados de esta tesis sugieren que, en ambientes del Chaco Semiárido, los sistemas pastoriles puros de cargas bajas a

moderadas demuestran ser más estables en el tiempo, debido a su mayor flexibilidad de ajustarse a la oferta de forraje en relación a la demanda.

Además, al comparar entre sistemas pastoriles puros e intensificados, fue posible observar que existe una relación directa entre la carga animal y la estabilidad en la producción de carne por hectárea en aquellos sistemas de cría que incorporaron el silaje de maíz como estrategia de alimentación. Los sistemas intensificados fueron más estables en relación a los pastoriles puros, demostrando el beneficio del silaje de maíz como herramienta para reducir variaciones en el consumo de forraje, la carga animal y la producción de carne.

Considerando que los productores deben tomar decisiones en entornos inciertos y dinámicos (Boehlje, 1999), es posible decir que el estudio de la intensificación a partir de la información generada mediante el modelo de simulación (Nasca *et al.*, 2015) y los sistemas reales de producción permitió evaluar satisfactoriamente la estabilidad de los sistemas de cría del Chaco semiárido en un contexto de alta variabilidad climática.

Capítulo 4:

Discusión general y conclusiones

4. Discusión General y conclusiones

4.1. Discusión general

A lo largo de esta tesis se ha analizado el comportamiento emergente de los sistemas bovinos pastoriles de cría de la región del Chaco semiárido argentino a través de dos propiedades emergentes: eficiencia y estabilidad. A continuación, en la Figura 4.1 se observa un diagrama circular de causalidad que resume las principales interacciones estudiadas. Luego se describen brevemente las principales respuestas encontradas y finalmente se presenta un apartado donde se declaran los aportes originales derivados de esta tesis y una sección en la cual se formulan algunos nuevos interrogantes que surgen a partir de este trabajo.

Los diagramas de causalidad, son esquemas comúnmente utilizados en la dinámica de sistemas. Son mapas en donde las variables de mayor incidencia en el sistema se encuentran conectadas por flechas denotando influencia (causalidad) entre las variables y agentes representados en un modelo de simulación (Sterman, 2000). Los diagramas de causalidad ayudan a denotar la estructura principal de interacciones de un sistema complejo y de esta manera, permiten capturar las hipótesis que se elaboran de un problema para abordarlo. Es importante remarcar, que los diagramas de causalidad son siempre de carácter provisorio, debido a que el modelo de simulación puede continuar su evolución conforme avance el proceso de aprendizaje (Sterman, 2000). Por otro lado, todas las relaciones surgen únicamente de la interacción de dos tipos de circuitos (bucles) de retroalimentación: a) Positivo, el cual tiende a reforzar o amplificar lo que está sucediendo en el sistema; y b) Negativo, el cual tiende a contrarrestar el cambio y balancear el sistema (Sterman, 2000).

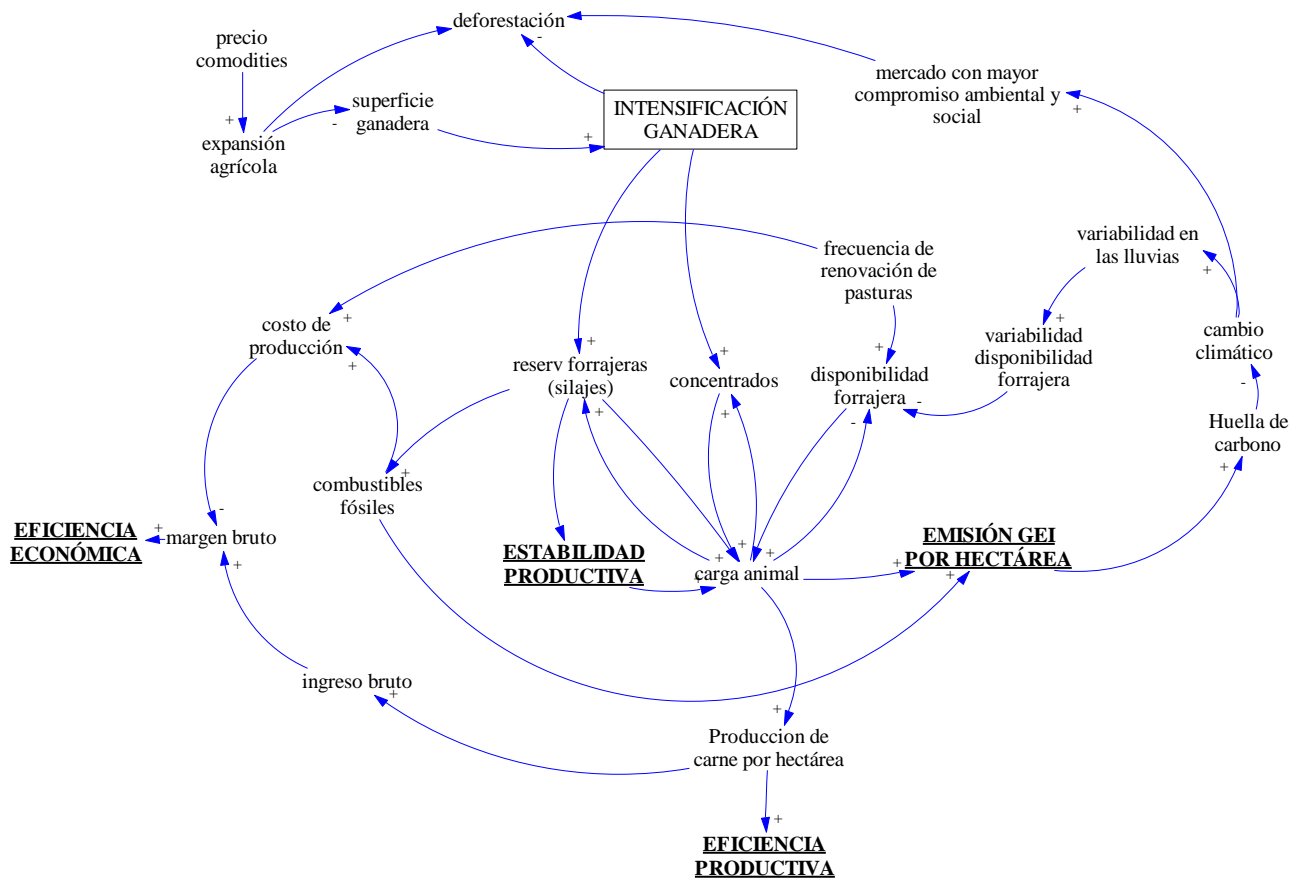


Figura 4.1: Diagrama de causalidad de las principales variables incorporadas en el estudio. El impacto positivo (+) o negativo (-) de una variable sobre otra se denota en la punta de las flechas (e.g. producción peso vivo por hectárea → (+) producción de carne).

La creciente demanda por parte de los productores ganaderos de cría bovina de incrementar la relación costo-beneficio se encuentra íntimamente ligada a la necesidad de aumentar la productividad por unidad de superficie siendo la intensificación de los sistemas una posible vía para alcanzarlo. En este sentido, la incorporación de forrajes conservados, como el silaje de maíz planta entera, se presenta como una oportunidad para mejorar la producción de carne y el resultado económico de los sistemas de producción, ya que permitiría incrementar la oferta de alimento y los niveles de carga animal que un sistema de cría puede sostener, impactando sobre la producción de carne y el beneficio económico. Algunos autores, sostienen que además la intensificación también permitiría reducir el impacto ambiental en relación a las emisiones de GEI (Capper *et al*, 2011), ya que el incremento en la eficiencia de producción en sistemas pastoriles está asociado a reducciones en la intensidad de emisión de gases de efecto invernadero (emisiones por kg producto) (Smeaton *et al.*, 2011; Ash *et al.*, 2015) principalmente en relación al gas metano de origen entérico, fuente de mayor peso en las emisiones bovinas (Faverín *et al.*, 2014). Sin embargo, para otros, la intensificación ganadera se

plantea como una amenaza ambiental preocupante, debido a la alta dependencia de insumos externos (Viglizzo y Roberto, 1997) y emisiones de GEI generadas a nivel de sistema de producción (emisiones por hectárea). Por otro lado, la variabilidad climática que caracteriza a las regiones semiáridas enfrenta a los productores a la incertidumbre en relación a cuáles son las reglas de decisión más adecuadas para el sistema productivo (Van Ittersum *et al.*, 2013), con el objetivo de generar no solo mejores resultados sino también más estables. En los sistemas de cría de la región del Chaco semiárido, si bien uno de los principales objetivos es alcanzar buenos niveles de producción, también se encuentra el desafío de sostenerlo en el tiempo. No obstante, varios autores (Merten, 1987, Conway, 1987) han demostrado que existen conflictos (trade offs) entre la productividad y la estabilidad productiva. Esto significa que el precio que suele pagarse por aumentar la productividad del sistema, puede resultar en una caída potencial de la estabilidad.

Los experimentos que se llevaron a cabo en esta tesis estuvieron guiados por tres objetivos principales junto a las hipótesis de trabajo correspondientes. El primer objetivo fue simular y analizar sistemas de cría bovina con niveles de intensificación crecientes bajo diversas condiciones climáticas, el cual se cumplió satisfactoriamente mediante la utilización del modelo de simulación desarrollado por Nasca *et al.* (2015) y los datos recolectados de distintos sistemas de producción de la región de estudio. El segundo objetivo fue evaluar el impacto de la intensificación ganadera sobre la eficiencia de los sistemas de cría del Chaco semiárido. La experiencia estuvo centrada en explorar el comportamiento de los sistemas en términos productivos, económicos y ambientales mediante la utilización de indicadores tales como la producción de carne por hectárea, el margen bruto y la huella de carbono generada en cada sistema de producción, simulando lo que podría ocurrir en condiciones reales de campo. La hipótesis 1, la cual postulaba que niveles de intensificación crecientes mejoran la producción de carne y el resultado económico de los sistemas de cría fue aceptada mediante los resultados obtenidos. Sin embargo, se observó que, por encima de cierto nivel de intensificación, mayores niveles de producción (kg carne por hectárea) generan incrementos relativos decrecientes en relación al margen bruto por hectárea. En este sentido, se observó que el comportamiento de los kilogramos destetados por hectárea, considerado uno de los principales componentes del resultado económico de la empresa ganadera, también expresó una tendencia de incrementos relativos decrecientes a mayores niveles de intensificación, con su respectivo impacto sobre el ingreso bruto obtenido para cada nivel de intensificación. La hipótesis 2, la cual proponía que niveles crecientes de intensificación incrementan el impacto ambiental en términos de emisiones de gases de efecto invernadero fue respaldada por los resultados obtenidos. Mayores niveles de producción de carne por hectárea, estuvieron asociados a mayores valores de KgCO₂eq emitidos anualmente por hectárea. Además, fue posible

observar que la localidad con mayor restricción en relación a las precipitaciones, presentó un mayor porcentaje de dióxido de carbono emitido respecto a las otras localidades, debido a una mayor utilización de insumos y consumo de combustibles fósiles para sostener los niveles de producción objetivo.

El tercer objetivo de esta tesis fue estudiar el impacto de la intensificación ganadera sobre la estabilidad de los sistemas de cría del Chaco semiárido en términos productivos relacionando i) los coeficientes de variación interanual de las precipitaciones y la producción de forraje en distintas localidades de la región, ii) los coeficientes de variación interanual de la producción de forraje y la carga animal para distintos sistemas pastoriles de cría de la región, iii) los coeficientes de variación interanual de la carga animal y de la precipitación anual a nivel de sistema de producción y finalmente, iv) comparar las relaciones entre la carga animal y la producción de carne por unidad de superficie en sistemas con niveles de intensificación creciente. La hipótesis subyacente señalaba que: 1) El incremento en la carga animal de los sistemas pastoriles puros se da en detrimento de la estabilidad productiva del sistema. Mediante los resultados obtenidos se observó una tendencia lineal significativa que explicó el 60% de los resultados obtenidos cuando la carga animal (Kg.ha^{-1}) y la variabilidad en la producción de carne fueron relacionados, y el 90% cuando se relacionó la variabilidad de la carga animal (CV%) junto a la variabilidad en la producción de carne. 2) Los sistemas de cría bovina que incorporan el silaje de maíz como estrategia de alimentación de los vientres son más estables que los sistemas de cría pastoriles puros. En este estudio se observó que los sistemas más intensificados expresaron un comportamiento sistémico superior en relación a la variabilidad de la carga animal y la producción de carne, así como también mayor estabilidad de la carga animal frente a variaciones en las precipitaciones. Por otro lado, en relación a la variación interanual de las precipitaciones y la producción de forraje se observó una tendencia lineal, en donde la precipitación en mm.año^{-1} explicó el 52% de la variabilidad interanual en la producción de forraje (Figura 3.3, capítulo 3), y la precipitación acumulada entre los meses de diciembre y marzo explicó entre el 35% y 42 % de la producción de materia seca de las pasturas megatérmicas utilizadas en este estudio (Figura 3.4, capítulo 3). A su vez, el coeficiente de variación interanual de la producción de forraje explicó el 40% ($p < 0.05$) de la variabilidad en la carga animal para distintos sistemas pastoriles de cría de la región. También a medida que se incrementó la carga animal, la variabilidad en la oferta de forraje disponible fue más acentuada, principalmente en las localidades con menor precipitación media anual (Figura 3.7, capítulo 3). Al relacionar el coeficiente de variación interanual de la carga animal a nivel de sistema (CV%) y la precipitación anual (mm.año^{-1}) como una medida de la variabilidad de la producción forrajera (Irisarri, 2012), no se encontró una relación directa. Sin embargo, la carga animal fue

Considerando que la eficiencia y estabilidad productiva son dos aspectos centrales para los tomadores de decisiones, y condicionan la continuidad de los sistemas, en la Figura 4.3 puede observarse la frontera de riesgo eficiente para la producción de carne tomando como ejemplo las localidades de Leales (845 mm.año⁻¹) y Recreo (421 mm.año⁻¹). La frontera de riesgo eficiente puede ser utilizada como una herramienta para la toma de decisiones, seleccionando donde operar dependiendo del beneficio deseado y el nivel de riesgo que está dispuesto a asumir (Cacho *et al.*, 1999, Romera, 2004). La frontera de riesgo eficiente está basada en la proposición que si el valor medio de la estrategia A es mayor que la estrategia B, y la varianza de A es menor a la varianza de B, entonces A es preferido (Feldkamp, 2004). La regla asume que cuando dos estrategias tienen el mismo valor, la que obtiene la menor variabilidad es elegida. La figura 4.3, muestra que utilizando la producción de carne por hectárea como criterio, los sistemas intensificados con una carga animal de 737 y 1415 Kg.ha⁻¹.año⁻¹ para el caso de Leales, y de 430 y 932 Kg.ha⁻¹.año⁻¹ para el caso de Recreo son preferidos sobre otras opciones, ya que alcanzan mayores valores de producción de carne (281 y 595 Kg.ha⁻¹.año⁻¹ y 134 y 286 Kg.ha⁻¹.año⁻¹ para Leales y Quimilí, respectivamente) con similar o menor riesgo que el resto de los sistemas.

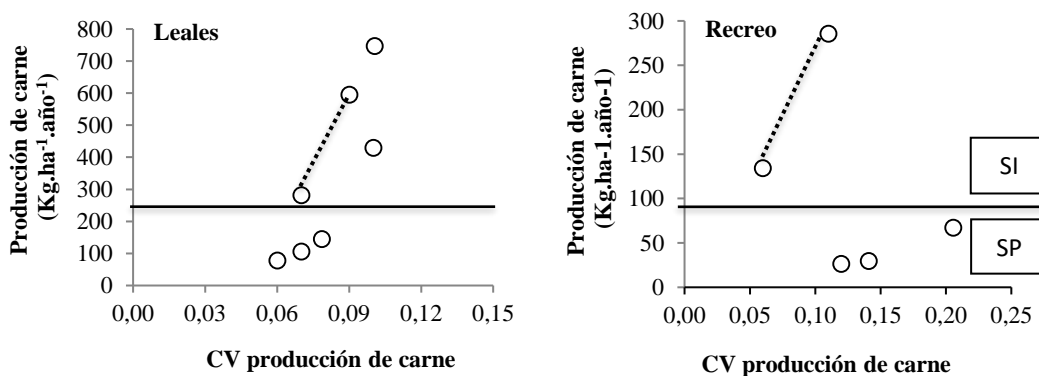


Figura 4.3: Frontera de riesgo eficiente para la producción de carne. Los valores fueron calculados a partir de los 50 años de corrida del modelo. La línea dentro del gráfico separa entre sistemas pastoriles puros (SP) e intensificados (SI).

4.2. Aportes originales derivados de esta tesis

Los resultados derivados de esta tesis aportan información acerca de posibles respuestas de los sistemas de cría bovina frente a diferentes escenarios de intensificación. Si bien antecedentes previos han abordado esta problemática, ha sido principalmente desde el corto plazo, considerando sólo algunos componentes de los sistemas de cría, soslayando las interacciones a nivel sistémico y

los retardos en el tiempo entre las reglas de manejo y su impacto, así como también las oscilaciones e inestabilidad propia de la dinámica de un sistema de producción altamente influido por el ambiente. Dado que la complejidad de los sistemas agropecuarios es cada vez mayor y considerando que los productores deben tomar decisiones en entornos inciertos y dinámicos, este trabajo incorporó el uso de los modelos de simulación como una importante herramienta de investigación y fuente de información, para contribuir en la generación de conocimiento relacionada al comportamiento emergente de los sistemas de cría bovina del Chaco semiárido argentino, y al impacto que generan en el sistema distintas reglas de manejo de alta incidencia, como lo son las estrategias relacionadas a la alimentación y selección de la carga animal. En este sentido, se abarcaron diferentes vacíos de información explorando con buen grado de detalle a nivel de sistema de producción, posibles escenarios de intensificación y las respuestas en términos productivos, económicos y ambientales. En términos de eficiencia, definida según Nasca *et al.*, 2015, O'Reagain *et al.*, 2009. Capper *et al.*, 2011 y Alvarado *et al.*, 2011, es posible inferir que los sistemas agropecuarios intensificados, si bien pueden ser mucho más eficientes que los de bajos insumos (Grau *et al.*, 2011), resulta algo necesario aunque no suficiente para alcanzar la superioridad en el comportamiento (Nasca *et al.*, 2015). En este sentido, considerables esfuerzos deberían realizarse para incorporar otras estrategias de producción mediante el uso de modelos de simulación con el espíritu de comparar, evaluar y discutir posibles diseños de sistemas de producción desde los paradigmas de land-sharing y land sparing. Históricamente, el productor ha tomado sus decisiones en base a una relación económica entre beneficios y costos, dejando de lado la relación entre el beneficio económico y el costo ambiental de tales decisiones (Viglizzo *et al.*, 2010a). Sin embargo, es un riesgo tomar decisiones de importancia económica y social sin evaluar el impacto ambiental que producirán (Viglizzo *et al.*, 2001). En base a los resultados obtenidos en este estudio, se respalda que los efectos ambientales de las actividades agropecuarias ligadas a la intensificación de los sistemas de producción generan un incremento significativo en el consumo de energía fósil y en la emisión de gases de efecto invernadero. En relación a ello, resulta estratégico contemplar nuevos estudios que evalúen en forma situada y desde una mirada sistémica, otras aristas del proceso ambiental, a los fines de complementar los resultados obtenidos en el presente estudio permitiendo evaluar en mayor profundidad y para cada contexto particular cuál es la mejor estrategia para conciliar producción y conservación de los recursos naturales. Por otro lado, incluir el estudio de la estabilidad de los sistemas de cría en relación a la variabilidad climática de la región resulta fundamental desde el punto de vista sistémico, ya que permite evaluar el impacto de una regla de decisión considerando las interacciones con el ambiente, facilitando así un mayor acercamiento y comprensión de los resultados obtenidos en condiciones reales de producción y viceversa.

Finalmente, el mayor aporte que este trabajo puede lograr es el de fomentar el debate y favorecer el aprendizaje tanto del ámbito académico como de la diversidad de actores involucrados, directa e indirectamente, en la toma de decisiones de la empresa agropecuaria. La economía está inmersa en un contexto social y político, que a su vez está inmerso en los ecosistemas de los que depende toda la vida. Por lo tanto, ambiente, economía y sociedad están íntimamente ligados y muchas veces en tensión, siendo un verdadero desafío para la ciencia, generar evidencia crítica y suficiente en torno al impacto generado por nuestras decisiones en aras de preservar la salud del medio ambiente al mismo tiempo que favorecer una economía que garantice los derechos humanos de las personas y satisfaga sus necesidades (Sterman, 2012).

4.3. Nuevos interrogantes que surgen a partir de la tesis

Los capítulos experimentales desarrollados plantean nuevos interrogantes y vacíos de información, los cuales podrían ser la base para realizar nuevos experimentos. Un aspecto a considerar en futuras evaluaciones de sistemas intensificados con carga moderada a alta y prolongada utilización de forrajes conservados a lo largo del año (días de utilización de silaje), es acerca de las implicancias prácticas y de manejo a nivel de predio del suministro de silaje en época de lluvias, lo cual posiblemente dificulta aspectos relacionados al consumo y la producción de carne del sistema. Además, en la decisión de incorporar el silaje al sistema de alimentación, también puede considerarse no solamente la influencia de la variabilidad interanual de las precipitaciones, sino también los factores económicos referentes a los cambios de corto plazo en el precio de los cereales (Lambin *et al.*, 2001).

Por otro lado, contemplando que tanto la producción de los sistemas ganaderos de las regiones semiáridas como su resultado económico se encuentran directamente relacionados con la cantidad y distribución de las precipitaciones (Nnaji, 2001; Sadras, 2002) y que, en este sentido la elección de la carga animal tiene consecuencias determinantes no solamente en el impacto productivo sino también a nivel económico de la empresa ganadera, futuros esfuerzos deberían realizarse para evaluar el impacto de la intensificación en términos de estabilidad económica. El concepto de que altas cargas en sistemas ganaderos de base pastoril maximizan el retorno económico, al menos en el corto plazo, debe quedar sujeto a un análisis de mayor complejidad debido al desafío de estos sistemas para mantener su nivel productivo en el tiempo (Stockwell *et al.* 1991; Lawrence *et al.* 1994; O'Reagain *et al.* 2009; Diaz Solis *et al.*, 2009). Sobrecargar el sistema en años secos, puede llevar al sistema a ventas forzadas por mala condición corporal de los animales, pérdidas de stock e inclusive mortandad (O'Reagain, 2009). Factores económicos como bruscas variaciones de precios en insumos y productos pueden también generar inestabilidad en las empresas agropecuarias (Timmer, 1997). Además,

los productores que adoptan cargas altas, en años secos pueden conducir al sistema a condiciones de sobrepastoreo (McKeon *et al.*, 2004) y a serias pérdidas económicas debido al incremento de los costos de alimentación, la venta forzada de animales con una pobre condición corporal e inclusive sufrir pérdidas por mortalidad (Hinton, 1993). Algunos autores (Teague *et al.*, 2009, O'Reagain *et al.* 2009) sugieren que en sistemas pastoriles puros las cargas moderadas son más productivas y económicamente rentables que las cargas altas. Por otro lado, la decisión de cargas bajas puede llevar a un retorno económico menor en años de buenas precipitaciones, pero en los años por debajo de la media pueden expresar un comportamiento superior en relación a cargas más altas, debido a un menor costo en alimentación y menor restricción en el consumo y productividad por animal (Foran and Stafford-Smith 1991). Además, en la dimensión ambiental, sería valioso evaluar el balance de gases de efecto invernadero en sistemas ganaderos de regiones subtropicales. En este sentido, nuevas mejoras deberían incorporarse en el modelo de simulación utilizado a los fines de estimar la captura de carbono, contemplando, por ejemplo, el impacto de las diferentes estrategias de manejo sobre la degradación de las pasturas y su efecto sobre el suelo.

A partir de los resultados obtenidos y con los nuevos interrogantes que surgen mediante esta tesis, sería deseable el planteo de nuevos experimentos que persigan generar conocimiento sobre el comportamiento emergente de los sistemas bovinos de cría en relación a la intensificación ganadera con el objetivo final de definir con éxito si es conveniente o no su consolidación en la región del Chaco semiárido argentino. Además, se plantea la necesidad de un estudio que contemple otras dimensiones de los sistemas, como por ejemplo la dimensión social, para poder evaluar simultáneamente el impacto a escala de sistema y a diferentes niveles de intervención.

5. Bibliografía

- Abdelhadi, L.O., Santini, F.J., Gagliostro, G.A., 2005. Corn silage or high moisture corn supplements for beef heifers grazing temperate pastures: effects on performance, ruminal fermentation and in situ pasture digestion. *Animal Feed Science and Technology* 118, 63–78.
- Adámoli J., Ginzburg, R., Torella, S. 2011. Escenarios productivos y ambientales del Chaco Argentino 1977-2010. Fundación Producir Conservando, 101 pp. http://www.producirconservando.org.ar/documentos/esenarios_productivos_ambientales_chaco.pdf
- Alvarado, P.; Castignani, H.; Caviglia, J.; D'Angelo, M. L.; Engler, P.; Ghida Daza, C.; Giorgetti, M.; Lorio, C.; Sánchez, C. Castignani. 2011. Indicadores económicos para la gestión de empresas agropecuarias. Bases metodológicas. *Estudios socioeconómicos de la sustentabilidad y recursos naturales*, N° 11. ISSN 1851-6955
- Angassa, A., & G. Oba. 2007. Relating long-term rainfall variability to cattle population dynamics in communal rangelands and a government ranch in southern Ethiopia. *Agricultural Systems* 94:715-725.
- Aparicio, S. y C. Gras (1999) “Las tipologías como construcciones metodológicas”. En *Estudios rurales, teorías, problemas y estrategias metodológicas*. Ed. La colmena. Bs. As.
- Ash AJ, Stafford-Smith DM., 1996. Evaluating stocking rate impacts in rangelands: animals don't practice what we preach. *The Rangeland Journal* 18, 216–243. doi:10.1071/RJ9960216.
- Avila, R.E., Di Marco, O., Agnusdei, M., 2012. Calidad nutritiva de láminas de *Chloris gayana* en estado vegetativo. Efecto de la reducción del tamaño foliar y envejecimiento. *Rev. Arg. Prod. Anim.* 20, 17–27.
- Baeza S, Lezama F, Pinheiro G, Altesor A, Paruelo JM (2010) Spatial variability of above-ground net primary production in Uruguayan grasslands: a remote sensing approach. *Applied Vegetation Science* 13: 72–85
- Bal, M.A., Coors, J.G. & Shaver, R.D. 1997. Impact of the maturity of corn for use as silage in the diets of dairy cows on intake, digestion and milk production. *Journal of Dairy Science* 80: 2497–2503. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(97\)76202-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)76202-7)
- Barretto AG, Berndes G, Sparovek G and Wirsenius S., 2013. Agricultural intensification in Brazil and its effects on land-use patterns: an analysis of the 1975–2006 period. *Global Change Biology* 19, 1804–1815.
- Basset, C., Ledgard, S., Boyes, M., 2009. Eco-efficiency of intensification scenarios for milk production in New Zealand, *Ecological Economics*, Volume 68, Issue 6, Pages 1615-1625, ISSN 0921-8009.

- Becoña, G.; Astigarraga, L.; Picasso, V.D. 2014. Greenhouse gas emissions of beef cow–calf grazing systems in Uruguay. *Sustainable Agriculture Research*, 3 (2), pp.89-105,10.5539/sar.v3n2p89
- Bert, F.E., Laciara, C.E., Podesta, G.P., Satorre, E.H, Menendez, A.N. 2007. Sensitivity of CERES-Maize simulated yields to uncertainty in soil properties and daily solar radiation *Agricultural Systems*, 94. pp. 141-150.
- Beukes, P.C., Gregorini, P., Romera, A.J., Levy, G., Waghorn, G.C., 2010. Improving production efficiency as a strategy to mitigate greenhouse gas emissions on pastoral dairy farms in New Zealand. *Agric. Ecosyst. Environ.* 136, 358–365.
- Bianchi, A.R; Volante, J.N; Neumann R.; Noe y Ac González., 2002. Mapa digital de Isohietas Anuales del NOA. INTA EEA, Salta.
- Boehlje, M., 1999. Structural Changes in the Agricultural Industries: How Do We Measure, Analyze and Understand Them?, *American Journal of Agricultural Economics*, Volume 81, Issue 5, Pages 1028–1041, <https://doi.org/10.2307/1244080>.
- Boom, C.J., Sheath, G.W., 1998. Grain supplementation of finishing beef cattle. In: *Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production*, vol. 58, pp. 239–242. <<http://nzsap.org.nz/sap6.html>>.
- Boom, C.J., Sheath, G.W., 1999. Tactical supplementation of beef finishing cattle. In: *Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production*, vol. 59, pp. 162–165. <<http://nzsap.org.nz/sap6.html>>.
- Bunge, M. 2004. *Emergencia y convergencia. Novedad cualitativa y unidad del conocimiento*. Editorial Gedisa, Buenos Aires. 398 p.
- Bungenstab, D.J., 2004. Environmental impacts of beef production in Central Brazil: the effect of intensification on area appropriation. PhD Thesis. Humboldt University. Berlín.
- Burrows WH, Orr DM, Hendricksen RE, Rutherford MT, Myles DJ, Back PV, Gowen R (2010) Impacts of grazing management options on pasture and animal productivity in a *Heteropogon contortus* (black spear-grass) pasture in central Queensland. 4. Animal production. *Animal Production Science* 50, 284–292. doi:10.1071/AN09145.
- Cabrera, A.L. (1976). *Regiones fitogeográficas argentinas*. Acme, Buenos Aires. 85 pp. En: Kugler WF (Ed) *Enciclopedia argentina de agricultura y jardinería*. Tomo 2. 2º edición. Acme. Buenos Aires, Argentina. Fascículo 1. pp. 1-85. Reeditado sin cambios en: Cabrera, AL (1994). *Regiones fitogeográficas argentinas*. En: Kugler WF (Ed) *Enciclopedia argentina de agricultura y jardinería*. Tomo 2. 2º edición. Acme. Buenos Aires, Argentina. Fascículo 1. pp. 1-85.

- Camberlin P, Moron V, Okoola R, Philippon N, Gitau W (2009) Components of rainy seasons' variability in Equatorial East Africa: onset, cessation, rainfall frequency and intensity. *Theoretical and Applied Climatology* 98: 237–249.
- Cantrell, J.A., Kropp, J.R., Armbruster, S.L., Lusby, K.S., Wettemann, R.P. y Hintz, R.L. 1982. The influence of postpartum nutrition and weaning age of calves on cow body condition, estrus, conception rate and calf performance of fall-calving beef cows. *Oklahoma Agric. Exp. Sta. Res. Rep. MP_112:53-64*.
- Capper, J. L. The environmental impact of beef production in the United States: 1977 compared with 2007, 2011. *J. Anim. Sci.* 89:4249–4261 doi:10.2527/jas.2010-3784.
- Carballo, C. (1996) La agricultura familiar en la Argentina. Situación actual y perspectivas. *Jornadas Nacionales de la Asociación Argentina de Extensión Rural*. Río Cuarto.
- Cárdenas, E., Vargas, J., Pabón, M., Carulla, J., 2012. Emisión de metano entérico en rumiantes en pastoreo. *Arch. Zootec* 61, 51-66.
- Cardoso, A.S, Berndt, A., Leytem, A., Alves, B., Carvalho, I., Soares, L., Urquiaga, S., Boddey, R., 2016. Impact of the intensification of beef production in Brazil on greenhouse gas emissions and land use. *Agricultural Systems* 143, 86–96.
- Casey, J.W., Holden, N.M., 2005b. The relationship between greenhouse gas emissions and the intensity of milk production in Ireland. *J. Environ. Qual.* 34, 429–436.
- Cederberg, C., Stadig, M., 2003. System expansion and allocation in life cycle assessment of milk and beef production. *Int. J. LCA* 8, 350–356.
- Chazdon, R.L., Harvey C.A., Komar O., van Bruegel M., Ferguson B.G., Griffith D., Martínez-Ramos M., Morales H., Nigh R., Soto-Pinto L., Philpott S.M. 2009. Beyond reserves: A Research agenda for conserving biodiversity in tropical cultural landscapes. *Biotropica* 41:142-153.
- Chigwa, F., Eik, L., Kifaro, G., Muhikambe, V., Mushi, D., 2015. Alternative goat kidrearing systems for improved performance and resource sharing between humans and offspring in climate change mitigation. In: Lal, R., Ram Singh, B., Mwaseba, D., Eik, L., Kraybill, D., Hansen, D. (Eds.), *Sustainable Intensification to Advance Food Security and Enhance Climate Resilience in Africa*. Springer, New York, 331–341.
- Cingolani, A.M., I. Noy-Meir, D. Renison & M. Cabido. 2008. La ganadería extensiva, ¿es compatible con la conservación de la biodiversidad y los suelos? *Ecología Austral* 18: 253-271.
- Cingolani, A.M., I. Noy-Meir, D. Renison & M. Cabido. 2008. La ganadería extensiva, ¿es compatible con la conservación de la biodiversidad y los suelos? *Ecología Austral* 18: 253-271.

- Clark, D.A., Lambert, M.G., 1989. The use of fertilizer nitrogen for increased animal production from New Zealand hill pastures. In: Proceedings of the XVI International Grassland Congress, pp. 1269–1270.
- Clough Y, Barkmann, J., Juhbandt, J., Kessler, M., Wanger, TC., Anshary, A., Buchori, D., Cicuzza, D., Darras, K., DwiPutra, D., Erasmi, S., Pitopang, R., Schmidt, C., Schulze, CH., Seidel, D., Steffan-Dewenter, I., Stenchly, K., Vidal, S., Weist, M., Wielgoss, AC., Tschardtke, T. 2011. Combining high biodiversity with high yields in tropical agroforests. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108:8311-8316.
- Clutton-Brock, T. H., Illius, A. W., Wilson, K. et al. 1997. Stability and instability in ungulate populations: an empirical analysis. – *Am. Nat.* 149: 195–219.
- Cone, J.W., Van Gelder, A.H., Van Schooten, H.A. & Groten, J.A.M. 2008. Effects of forage maize type and maturity stage on in vitro rumen fermentation characteristics. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences* 55: 139–154. [https://doi.org/10.1016/S1573-5214\(08\)80033-4](https://doi.org/10.1016/S1573-5214(08)80033-4).
- Conway, G.R., (1987). The Properties of Agroecosystems. *Agricultural Systems* 24, 95-117.
- Cook, j. G., l. J. Quilnan, l. L. Irwin, l. D. Bryant, r. A. Riggs, and j. W. Thomas. 1996. Nutrition-growth relations of elk calves during late summer and fall. *Journal of Wildlife Management* 60:528–541.
- Cortner, O., Garrett, R.D., Valentimc, J.F., Ferreirad, J., Nilese, M.T., Reif, J., Gil J., 2019. Perceptions of integrated crop-livestock systems for sustainable intensification in the Brazilian Amazon. *Land Use Policy* 82, 841–853.
- Cowan, T. 2000. Use of ensiled forages in large-scale animal production systems in the tropics. Paper presented in the FAO e-conference on Tropical Silage, 1 September – 15 December 1999. P. 29-37, in FAO, 2000
- Cros, M.J., Duru, M.b., Garcia, F., Martin-Clouaire, R., 2004. Simulating management strategies: the rotational grazing example. *Agricultural Systems* 80, 23–42.
- Cros, M-J., Duru, M., Garcia, F., Martin-Clouaire, R., 2003. A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies. *Agronomie* 23, 105-122.
- Crosson P, Foley PA, Shalloo L, O'Brien D, Kenny DA. 2010. Greenhouse gas emissions from Irish beef and dairy production systems. *Advances in animal biosciences. Food, Feed, Energy and Fibre from Land—A Vision for 2020 Proceedings of British society of Animal Science and the agricultural research forum, Cambridge, UK, Cambridge University press, 350 p.*
- Crush JR; Rowarth JS. 2007. The role of C4 grasses in New Zealand pastoral systems. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 50:125–137. DOI: 10.1080/00288230709510287

- Danckwerts, J. 1989. Animal Performance. Cap. 6. Pp.: 53-55 en: Veld management in the Eastern Cape. Pasture Research Section, Eastern Cape Region. Department of Agriculture and Water Supply
- Davies, L.J; McNaughton, K.G. 1980. Effect of winter herbage cover on survival and spring growth of tropical grasses in a temperate environment. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 23:331–337. DOI: 10.1080/00288233.1980.10425364.
- De Wit, C.T., 1992. Resource use efficiency in agriculture. *Agricultural Systems* 40, 125–151.
- Del Grosso, S., W. Parton, T. Stohlgren, D. Zheng, D. Bachelet, S. Prince, K. Hibbard, & R. Olson. 2008. Global potential net primary production predicted from vegetation class, precipitation, and temperature. *Ecology* 89:2117-2126.
- DeRamus, H.A., Clement, T.C., Giampola, D.D. and Dickison, P.C. 2003. Methane emissions of beef cattle on forage: Efficiency of grazing management system. *J Environ Qual*, 32: 269-277.
- Deshmukh, I.K. (1984) A common relationship between precipitation and grassland peak biomass for east and southern Africa. *African Journal of Ecology*, 22, 181-186.
- Dhuyvetter, D.V. y Caton, J.S. Manipulation of reproduction and lactation with supplementation in beef cattle. En M.B. Judkins y F.T. McCollum III (Eds.) *Proc. 3rd Grazing Livestock Nutrition Conference. Proc. West. Sec. Amer. Soc. Anim. Sci.* 1996. 47 (Suppl. 1); 83-93.
- Dias-Filho MB (2007) *Degradacao de pastagens: Processos, causas e estrategias de recuperacao*. Bele´m, Brasil: Embrapa. 190 p.
- Diaz Solis, H., Grant, W.E., Kothmann, M.M., Teague, W.R., Díaz-García, J.A., 2009. Adaptive management of stocking rates to reduce effects of drought on cow-calf production systems in semi-arid rangelands. *Agric. Syst.* 100, 43–50.
- Diaz Solis, H., Kothmann, M.M., Grant, W.E., De Luna-Villarreal, R., 2006. Application of a simple ecological sustainability simulator (SESS) as a management tool in the semi-arid rangelands of northeastern Mexico. *Agricultural Systems* 88, 514–527.
- Di Rienzo, Julio & Casanoves, Fernando & Balzarini, Mónica & Gonzalez, Laura & Tablada, Margot & Robledo, Carlos. (2008). *InfoStat Versión 2011*.
- Doren, P.E., Shumway, C.R., Kothmann, M.M., Cartwright, T.C., 1985. An economic evaluation of simulated biological production of beef cattle. *Journal of Animal Science* 60, 913–934.

- Eaton DP, Santos SA, Santos MCA, Lima JVB and Keuroghlian A 2011. Rotational grazing of native pasturelands in the Pantanal: an effective conservation tool. *Tropical Conservation Science* 4, 39–52.
- Ellis, J. E. and Swift, D. M. 1988. Stability of African pastoral ecosystems: alternate paradigms and implications for development. – *J. Range Manage.* 41: 450–459.
- Elton CS (1958) *The ecology of invasions by animals and plants*. Chicago;London: The University of Chicago Press. 181 p.
- Ericsson, K. & Nilsson, L.J. 2006. Assessment of the potential biomass supply in Europe using a resource-focused approach. *Bio-mass & Bioenergy* 30: 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.09.001>.
- Ewers, R.M., Scharlemann, J.P.W., Balmford, A., Green, R.E. 2009. Do increases in agricultural yield spare land for nature? *Global Change Biology* 15:1716-1716.
- Ewers, R.M., Scharlemann, J.P.W., Balmford, A., Green, R.E. 2009. Do increases in agricultural yield spare land for nature? *Global Change Biology* 15:1716-1716.
- Fahey TJ, Knapp AK (2007) Primary production: Guiding principles and standards for measurement. In: Fahey TJ, Knapp AK, eds. *Principles and standards for measuring primary production*. New york: Oxford University Press Inc. pp 3–11.
- Fang, J., S. Piao, Z. Tang, C. Peng, & W. Ji. 2001. Interannual variability in net primary production and precipitation. *Science* 293:1723.
- FAO. 2007. *Situación de los bosques del mundo 2007*. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia.
- Faverín, C.; Gratton, R.; Machado, C., 2014. Emisiones de gases de efecto invernadero en sistemas de producción de carne vacuna de base pastoril. *Revista Argentina de Producción Animal* 34 (1): 33-54.
- Feldkamp, C.R., 2004. *Cow-Calf Operation in Argentina: a Systems Approach to Intervention Assessment*. PhD Thesis. Humboldt University, Berlín. 205p
- Feldkamp, C.R.; Sampedro, Daniel Horacio; Schwartz, H.J.; Udo, H. 2005. Influencia del manejo sobre el comportamiento de los sistemas de cría. *Revista argentina de producción animal*. v. 25. supl. 1.
- Fernández, P.D; Kuemmerle, T., Baumann, M., Grau, H.R., Nasca, J., Radrizzani, A., Gasparri, I., 2020. Understanding the distribution of cattle production systems in the South American Chaco, *Journal of Land Use Science*. DOI: 10.1080/1747423X.2020.1720843

- Fernández Rosso, C.; Lauric, A.; de Leo, G.A; Bilotto, F.; Torres Carbonell, C.; Machado, C.F. 2018. Modelación productiva, económica y emisión de metano en sistemas de cría vacuna de Bahía Blanca y Coronel Rosales. *RIA*, 44, 129-135.
- Ferreyra, R.A., G.P. Podestá, C.D. Messina, D. Letson, J. Dardanelli, E. Guevara, S. Meira. 2001. A linked-modeling framework to estimate maize production risk associated with ENSO-related climate variability in Argentina *Agric. For. Meteorol.*, 107, pp. 177-192.
- Fisher MJ, Rao IM, Ayarza MA, Lascano CE, Sanz JI, et al. (1994) Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature* 371: 236–238.
- Foley P.A. , Crosson P., Lovett D.K. , Boland T.M., O'Mara F.P., Kenny D.A., 2011. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 142, 222–230.
- Foran, BD, Stafford-Smith DM (1991) Risk, biology and drought management strategies for cattle in central Australia. *Environmental Management* 33, 17–33. doi: 10.1016/S0301-4797(05)80045-3
- Forrester JW (1969) *Urban dynamics*. Pegasus Communications, Waltham, MA.
- Freer, M., Moore, A.D, Donnelly, J.R., 1997. GRAZPLAN: Decision Support Systems for Australian Grazing Enterprises-II. The Animal Biology Model for Feed Intake, Production and Reproduction and the GrazFeed DSS. *Agricultural Systems* 54, 17-126.
- Frick, C.F.; Borges, M.; Sampedro, D.H. y Vogel, O. Factores que afectan la fertilidad de vaquillonas entoradas a los 18 meses. *Rev. Arg. Prod. Anim.* 2003. 23 (Supl. 1); 255-256
- Fritz H, Duncan P (1994) On the carrying capacity for large ungulates of African savanna ecosystems. *Proc R Soc Lond B* 256: 77-82.
- Fynn, R. & O'Connor, T. (2000). Effect of stocking rate and rainfall on rangeland dynamics and cattle performance in a semi-arid savanna, South Africa. *Journal of Applied Ecology*. 37. 491-507. 10.1046/j.1365-2664.2000.00513.x
- García Collazo, M.A; Panizza, A.; Paruelo, J.M. 2013. Ordenamiento Territorial de Bosques Nativos: Resultados de la Zonificación realizada por provincias del Norte argentino. *Ecología Austral* 23:97-107. Asociación Argentina de Ecología
- Garnett, T., Appleby, M., Balmford, A., 2013. Sustainable intensification in agriculture: premises and policies. *Science* 341, 33–34.

Garrett, R.D., Levya, S., Carlsonb, K.M., Gardnerc, T.A., Godarc, J., Clappd, J., Dauvergne, P., Heilmayrf, R., le Polain de Warouxg, Y., Ayreh, B., Barri, R., Døvre, B., Gibbsj, H.K., Hallk, S., Lakeh, S., 2019. Criteria for effective zero-deforestation commitments. *Global Environmental Change* 54, 135–147.

Gasparri, N.I., H.R. Grau, and E. Manghi. 2008. Carbon pools and emissions from deforestation in extra-tropical forests of northern Argentina between 1900 and 2005. *Ecosystems* 11(8): 1247–1261

Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A. & Tempio, G. 2013. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.

Gillingham, A.G., Morton, J.D., Gray, M.H., 2007. Pasture responses to phosphorus and nitrogen fertilisers on East Coast hill country: total production from easy slopes. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 50 (3), 307–320.

Grau, H.R., N.I. Gasparri, and T.M. Aide. 2005b. Agriculture expansion and deforestation in seasonally dry forests of north-west Argentina. *Environ. Conserv.* 32(02): 140.

Grau, H.R., T.M. Aide y N.I. Gasparri. 2005. Globalization and soybean expansion into semiarid ecosystems of Argentina. *Ambio* 34:267-268

Grau, R., Gasparri, N. I, Gasparri, M. A., 2011. Cambio y eficiencia de uso del territorio en el chaco argentino: el conflicto entre producción de alimentos y conservación de la naturaleza en distintas escalas. *Valoración de Servicios Ecosistémicos. Conceptos, Herramientas y Aplicaciones para el Ordenamiento Territorial.*, Cap. 17, Publisher: Ediciones INTA, Editors: Lathera, Jobbagy, Paruelo, pp.390-406.

Green, R.E., Cornell, S.J., Scharlemann, J.P.W., Balmford, A. 2005a. Farming and the fate of wild nature. *Science* 307:550-555.

Guevara, E., Meira, S., Maturano, M., Coco, G., 1999. Maize simulation for different environments in Argentina. In: *International Symposium: Modeling cropping systems*. European Society of Agronomy, University of Lleida, Catalonia, Spain, pp. 193–194.

Haas, G., Wetterich, F., Köpke, U., 2001. Comparing intensive, extensified and organic grassland farming in southern Germany by process life cycle assessment. *Agric. Ecosyst. Environ.* 83, 43–53.

Hernández-Mendo O, Leaver JD, 2004. Effect of replacing time available for grazing with time available for eating maize silage and soyabean meal on milk yield and feeding behaviour in dairy cows. *Grass and Forage Science* 59, 318–330.

- Hinton AW 1993. Economics of beef production in the Dalrymple Shire, Department of Primary Industries, Brisbane, Australia, 100pp.
- Hoogenboom, G., J.W. Jones, P.W. Wilkens, C.H. Porter, K.J. Boote, L.A. Hunt, U. Singh, J.L. Lizaso, J.W. White, O. Uryasev, F.S. Royce, R. Ogoshi, A.J. Gijsman, G.Y. Tsuji, and J. Koo. 2012. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5. University of Hawaii, Honolulu, Hawaii.
- Hristov, A. N.; Ott, T.; Tricarico, J.; Rotz, A.; Waghorn, G.; Adesogan, A.; Dijkstra, J.; Montes, F.; Oh, J.; Kebreab, E.; Oosting, S. J.; Gerber, P. J.; Henderson, B.; Makkar, H. P. S.; Firkins, J. L., 2013. Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: III. A review of animal management mitigation options. *J. Anim. Sci.*, 91 (11): 5095–5113.
- Illius, A. W. and O'Connor, T. G. 1999. On the relevance of nonequilibrium concepts to semi-arid grazing systems. – *Ecol. Appl.* 9: 798–813.
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) - Santiago del estero. Resumen de datos diarios provenientes de estaciones meteorológicas automáticas y convencionales, distribuidas en la provincia de Santiago del Estero. <http://santiago.inta.gov.ar/meteo/Seguridad/Resumensual.aspx>.
- INTA. 1990. Atlas de Suelos de la República Argentina E 1:500.000 y 1:1000.000. SAGyP, INTA CIRN.- Proyecto PNUD ARG 85/019.
- IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (eds.), Cambridge, United Kingdom and New York
- Irisarri, J.G.N., 2012. Variación espacial y temporal de la producción primaria neta aérea y secundaria neta. Tesis Doctorado Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias, 86 p.
- Janssen, S. and van Ittersum, M.K. (2007) Assessing Farm Innovations and Responses to Policies: A Review of Bio-Economic farm Models. *Agricultural Systems*, 94, 622-636.
<https://doi.org/10.1016/j.agsy.2007.03.001>.
- Jensen, C., Weisbjerg, M.R., Nørgaard, P. & Hvelplund, T. 2005. Effect of maize silage maturity on site of starch and NDF digestion in lactating dairy cows. *Animal Feed Science and Technology* 118: 279–294.
<https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2004.10.011>.
- Johnston PW, McKeon GM, Buxton R, Coban DH, Day KA, Hall WB, Scanlan JC, 2000. Managing climatic variability in Queensland's grazing lands – new approaches. In 'Applications of seasonal climate forecasting

in agricultural and natural ecosystems: the Australian experience'. (Eds GL Hammer, N Nicholls, C Mitchell) pp. 197–226. (Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, The Netherlands).

Johnston WH. 1996. The place of C4 grasses in temperate pastures in Australia. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 39:527–540. DOI: 10.1080/00288233.1996.9513213

Jones, C. A., J. R. Kiniry, P. T. Dyke, D. B. Farmer, and D. C. Godwin. 1986. *CERES-Maize: A Simulation Model of Maize Growth and Development*. Texas A&M University Press, College Station. 194 p.

Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J., Ritchie, J.T., 2003. DSSAT Cropping System Model. *Eur. J. Agron.* 18: 235–265

Jones, P.G. and Thornton, P.K. (2000) MarkSim: Software to Generate Daily Weather Data for Latin America and Africa. *Agronomy Journal*, 9, 445-453. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.923445x>.

Keating, B.A., Carberry, P.S., Bindraban, P.S., Asseng, S., Meinke, H., Dixon, J., 2010. Eco-efficient agriculture: concepts, challenges, and opportunities. *Crop Sci.* 50, S–109.

Khan, N.A., Yu, P., Ali, M., Cone, J.W. & Hendriks, W.H. 2015. Nutritive value of maize silage in relation to dairy cow performance and milk quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 95: 238–252. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6703>.

Knapp AK, Burns CE, Fynn RW, Kirkman KP, Morris CD, et al. (2006) Convergence and contingency in production-precipitation relationships in North American and South African C4 grasslands. *Oecologia* 149: 456–464.

Knight, Jan C., Kothmann, M.M., Mathis, G.W., Hinnant, R.T., 1990. Cow-calf production with alternative grazing systems. *Journal of Production Agriculture* 3, 407–414.

Kolver, E.S., Roche, J.R., Miller, D. and Densley, R., 2001. Maize silage for dairy cows. In: *Proceedings of the New Zealand Grassland Association*, vol. 63, pp. 195–201. <<http://www.grassland.org.nz/publications.php?>>.

Kothmann, M.M., Mathis, G.W., Waldrip, W.J., 1971. Cow–calf response to stocking rate and grazing systems on native range. *Journal of Range Management* 24, 100–105.

Kothmann, M.M., Smith, G.M., 1983. Evaluating management alternatives with a beef production systems model. *Journal of Range Management* 36, 733–740.

Kurihara, M, Magner, T., Hunter, R. A., McCrabb G. J., 1999. Methane production and energy partition of cattle in the tropics. *British Journal of Nutrition*, 81, 227–234.

- Lane, D.R., Coffin, D.P., Lauenroth, W.K., 1998. Effects of soil texture and precipitation on aboveground net primary productivity and vegetation structure across the Central Grassland region of the United States. *J. Vegetation Science* 9 (2), 239–250.
- Latawiec A. E., Strassburg B. N., Valentim J. F., Ramos F. and H. N. Alves-Pinto. 2014. Intensification of cattle ranching production systems: socioeconomic and environmental synergies and risks in Brazil. *Animal* 8:8, pp 1255–1263, The Animal Consortium 2014. doi:10.1017/S1751731114001566
- Laterra P., Jobaggy E., Paruelo J.M., eds. 2011. Valoración de servicios ecosistémicos - Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. Buenos Aires: INTA Buenos Aires. 740 pág.
- Lauenroth WK, Sala OE (1992) Long-Term Forage Production of North American Shortgrass Steppe. *Ecological Applications* 2: 397–403.
- Lawrence DM, Graham TWG, Clark RA (1994) Sustainable grazing management: grazier's perspectives and implications for pasture management in the Maranoa region, South Queensland. *Tropical Grasslands* 28,24–31.
- Le Houerou, H.N., Bingham, R.L. & Skerbek, W. (1988) Relationship between the variability of primary production and variability of precipitation in world arid lands. *Journal of Arid Environments*, 15, 1-18.
- Liu, S., Yang, J.Y., Zhang, X.Y., Drury, C.F., Reynolds, W.D., Hoogenboom, G., 2013. Modelling crop yield, soil water content and soil temperature for a soybean–maize rotation under conventional and conservation tillage systems in Northeast China. *Agric. Water Manage.* 123, 32–44.
- Lopera Palacios, J. (1991) Campesinos y Empresarios: ¿dos economías diferentes?. ICA INFORMA. Vol. 25, Colombia.
- Lusigi, W., 1995. Measuring Sustainability in Tropical Rangelands: a Case Study from Northern Kenya. In: Munasinghe, M., Shearer, W. (Eds.), *Defining and Measuring Sustainability: The Biogeophysical Foundations*. The World Bank, Washington, D.C, 278–303.
- Maddonni, A., Mercau, J.L., Ruiz R.A., Satorre E.H., 2004. Esquemas de alta producción de maíz en la región Litoral sur de aacrea (provincia de entre ríos). *Impacto de variables edáficas y climáticas. Revista Científica Agropecuaria* 8(1): 79-90.
- Magrin, G.O., Travasso, M.I. & Rodríguez, G.R. 2005. Changes in Climate and Crop Production During the 20th Century in Argentina. *Climatic Change* 72: 229. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-5374-9>.
- Marengo, J. A., B.Liebmann, V. E.Kousky, N. P.Filizola, and I. C.Wainer, 2001: Onset and end of the rainy season in the Brazilian Amazon basin.*J. Climate*, 14, 833–852.

- Marston, T.T., K.S. Lusby, and R.P. Wettemann. 1992. Pre- and post-calving protein or energy supplementation of spring-calving beef cows. *Okl. State Anim. Sci. Rpt.* MP-136:179.
- Marten, G.G., 1988. Productivity, stability, sustainability, equitability and autonomy as properties for agroecosystem assessment. *Agricultural Systems* 26, 291-316.
- Martin, G., Duru, M., Schellberg, J., Ewert, F., 2012. Simulations of plant productivity are affected by modelling approaches of farm management. *Agricultural Systems* 109, 25-34.
- Martin, G., Martin-Clouaire, R., Rellier J.-P., Duru, M., 2011. A simulation framework for the design of grassland-based beef-cattle farms. *Environmental Modelling and Software* 26, 371-385.
- McCall, D.G., Bishop-Hurley, G.J., 2003. A pasture growth model for use in a whole-farm dairy production model. *Agricultural Systems* 76, 1183-1205.
- McKeon G, Cunningham GM, Hall WB, Henry BK, Owens JS, Stone GS, Wilcox DG (2004) Degradation and recovery episodes in Australia's rangelands: an anthology. In 'Pasture degradation and recovery in Australia's rangelands: learning from history'. (Eds G McKeon, WB Hall, BK Henry, GS Stone, IW Watson) pp. 87–172. (Queensland Department of Natural Resources, Mines and Energy: Brisbane).
- McKeon GM, Stone GS, Syktus JI, Carter JO, Flood NR, Ahrens DG, Bruget DN, Chilcott CR, Cobon DH, Cowley RA, Crimp SJ, Fraser GW, Howden SM, Johnston PW, Ryan JG, Stokes CJ, Day KA. 2009. Climate change impacts on northern Australian rangeland livestock carrying capacity: a review of issues. *The Rangeland Journal* 31, 1–29.
- McNaughton, S.; Oesterheld, M.; Frank, D.; Williams, K. 1989. Ecosystem – level patterns of primary productivity and herbivory in terrestrial habitats. *Nature*. 341: 142 – 144.
- Meinke, H. and Stone, R.C., 2005. Seasonal and interannual climate forecasting: the new tool for increasing preparedness to climate variability and change in agricultural planning and operations. *Climatic Change*, 70: 221-253.
- Mercau, J.L., Satorre, E.H., Otegui, M.E., Maddoni, G.A., Cárcova, J., Ruiz, R., Uribelarrea, M., Menendez, F.J., 2001. Evaluación a campo del comportamiento del modelo CERES en cultivos de maíz del norte de la provincia de Buenos Aires. VII Congreso Nacional de Maíz, Pergamino, Argentina.
- Millen, D.D., Arrigoni, M.D.B., 2013. Drivers of change in animal protein production systems: changes from 'traditional' to 'modern' beef cattle production systems in Brazil. *Anim. Front.* 3 (3), 56e60.
<http://dx.doi.org/10.2527/af.2013-0025>.

- Morecroft, J.D., 2007. Strategic modelling and business dynamics. A feedback systems approach. Eds John Wiley y Sons Ltd, England. 466p.
- Moreira Muzio, M., Gaioli, F., y Galbusera, S. (2019). Inventario nacional de gases de efecto invernadero: Argentina, 2019. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- Morello, J., S. Matteuchi, A. Rodriguez, M. Silva, M. 2012. Ecorregiones y complejos ecosistémicos argentinos. Orientación Gráfica Editora. Buenos Aires, Argentina. 752 p.
- Morón V, Robertson AW, Ward MN, Camberlin P (2007) Spatial Coherence of Tropical Rainfall at the Regional Scale. *Journal of Climate* 20: 5244–5263.
- Mosqueda LR, González RA, 1998. Effect of anual stocking rate in grass and maize + rye systems on production by dairy cows. *Grass and Forage Science* 53: 95 – 108.
- Mott, G.O., 1960. Grazing pressure and the measurement of pasture production. Proceedings of the Eighth International Grassland Congress. Held at the University of Reading, England, 11-21 July 1960. Reading, England. 606-611.
- Muir, P.D., Smith, N.B., Wallace, G.J., Cruickshank, G.J., Smith, D.R., 1998. The effect of short-term grain feeding on liveweight gain and beef quality. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 41 (4), 517–526.
- Müller, R., D. Müller, F. Schierhorn, G. Gerold, and P. Pacheco. 2012. Proximate causes of deforestation in the Bolivian lowlands: an analysis of spatial dynamics. *Reg. Environ. Chang.* 12(3): 445–459.
- Murray RM, Bryant AM and Leng RA 1976. Rates of production of methane in the rumen and large intestines of sheep. *British Journal of Nutrition* 36, 1–14.
- Nasca, J., Feldkamp, C.R., Arroquy, J.I., Colombatto, D., 2015 Efficiency and stability in subtropical beef cattle grazing systems in the northwest of Argentina. *Agricultural Systems* 133, 85–96.
- Navarro-Villa, A., O'Brien, M., López, S., Boland, TM. and O'Kiely, P. 2011. In vitro rumen methane output of red clover and perennial ryegrass assayed using the gas production technique (GPT). *Anim Feed Sci Technol*, 168: 152-164.
- Ngwira, A. R., Aune, J. B., & Thierfelder, C. (2014). DSSAT modelling of conservation agriculture maize response to climate change in Malawi. *Soil and Tillage Research*, 143, 85–94.
doi:10.1016/j.still.2014.05.003.

- Nie, Z.N., Barker, D.J., Mackay, A.D., Valentine, I., Hodgson, J., 1998. Influence of the timing and duration of pastoral fallowing and nitrogen fertiliser on pasture and white clover (*Trifolium repens* L.) growth in hill country. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 41 (1), 19–29.
- Nnaji, A., 2001. Forecasting seasonal rainfall for agricultural decision-making in northern Nigeria. *Agric. Forest Meteorol.* 107, 193–205.
- Nosetto, M.D., E.G. Jobbágy, and J.M. Paruelo. 2005. Land-use change and water losses: the case of grassland afforestation across a soil textural gradient in central Argentina. *Glob. Chang. Biol.* 11(7): 1101–1117.
- Nouna, B., Katerji, N., Mastrorilli, M., 2000. Using the CERES-Maize model in a semi-arid Mediterranean environment. Evaluation of model performance. *European Journal of Agronomy* 13 (4), 309/322.
- Noy-Meir, I. 1973. Desert Ecosystems: Environment and Producers. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4:25-51.
- O'Brien, D., Shalloo, L., Grainger, C., Buckley, F., Horan, B., Wallace, M., 2010. The influence of strain of Holstein-Friesian cow and feeding system on greenhouse gas emissions from pastoral dairy farms. *J. Dairy Sci.* 93, 3390–3402.
- O'Connor TG, Haines LM, Snyman HA (2001) Influence of precipitation and species composition on phytomass of a semi-arid African grassland. *Journal of Ecology* 89: 850–860.
- O'Reagain P, Bushell J, Holloway, C., Reid, A. 2009. Managing for rainfall variability: effect of grazing strategy on cattle production in a dry tropical savanna. *Animal Production Science*, 49, 85–99.
- O'Reagain P, Bushell J, Holmes B, 2011. Managing for rainfall variability: long-term profitability of different grazing strategies in a northern Australian tropical savanna. *Animal Production Science*, 2011, 51, 210–224.
- Observatorio Ganadero (2013). Caracterización regional: Noroeste argentino. Observatorio de la Cadena de la Carne Bovina de Argentina, informe N°3. Buenos Aires, Argentina. 14 pág.
- Oesterheld, M., O. E. Sala, & S. J. McNaughton. 1992. Effect of animal husbandry on herbivore-carrying capacity at a regional scale. *Nature* 356:234-236.
- Oliveira Silva, R., Barioni, L., Hall, J., Folegatti Matsuura, M., Zanetti Albertini, T., Fernandes, F., Moran, D., 2016. Increasing beef production could lower greenhouse gas emissions in Brazil if decoupled from deforestation. *Nature Climate Change* volume 6, pages 493–497.

- Orr DM, Evenson CJ, Lehane JK, Bowly PS, Cowan DC (1993) Dynamics of perennial grasses with sheep grazing in *Acacia aneura* woodlands in south-west Queensland. *Tropical Grasslands* 27, 87–93.
- Ospina, S., Rusch, G., Pezo, D., Casanoves, F., Sinclair, F. (2012). More Stable Productivity of Semi Natural Grasslands than Sown Pastures in a Seasonally Dry Climate. *PLoS ONE* 7(5): e35555. doi:10.1371/journal.pone.0035555.
- Otegui, M. E.; Ruiz, R. A.; Petruzzi, D., 1996. Modeling hybrid and sowing date effects on potential grain yield of maize in a humid temperate region. *Field Crops Res.* 47: 167-174.
- Owen-smith, N. 2007. The comparative population dynamics of browsing and grazing ungulates. In: I. J. Gordon and H. H. T. Prins [EDS.]. *The ecology of browsing and grazing*. Berlin, Germany: Springer. p. 149–177.
- Parsch, L., Popp, M., and Loewer, O. 1997. Stocking rate risk for pasture-fed steers under weather uncertainty. *Journal of Range Management* 50: 541-549.
- Paruelo, J. M., W. K. Lauenroth, I. C. Burke, & O. E. Sala. 1999. Grassland precipitation-Use Efficiency varies across a resource gradient. *Ecosystems* 2:64-68.
- Paruelo, J.M., J.P. Guerschman, S.R. Verón, G. Piñeiro, G. Baldi, E.G. Jobbágy, and S. Baeza. 2006. Cambios en el uso de la tierra en Argentina y Uruguay: marcos conceptuales para su análisis. *Agrociencia* 10(2): 47–61.
- Penman, H. 1948. Natural evapotranspiration water, base soil and grass. *Proc. Royal Soc. Am. London.* 193: 120-143.
- Pérez H.E. 1992. Las pasturas cultivadas en la EEA INTA Santiago del Estero. En: Jornadas de actualización técnica en producción bovina en áreas de secano de Santiago del Estero, INTA, 162 p, 23, 24 y 25 de abril, Santiago del Estero, Argentina.
- Phalan B., Onial M., Balmford A. and Green R., 2011b. Reconciling food production and biodiversity conservation: land sharing and land sparing compared. *Science* 333, 1289–129.
- Philpott S.M., Dietsch T.V. 2003. Coffee and conservation: a global context and farmer involvement. *Conservation Biology* 17:1844-1846.
- Picasso, V.D.; Modernel, P.D.; Becoña, G.; Salvo, L.; Gutiérrez, L.; Astigarraga, L. 2014. Sustainability of meat production beyond carbon footprint: a synthesis of case studies from grazing systems in Uruguay, *Meat Science*, Volume 98, Issue 3, pages 346-354, ISSN 0309-1740.

<https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.07.005>.(<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0309174014002265>).

Pretty, J., Toulmin, C., Williams, S., 2011. Sustainable intensification in African agriculture. *Int. J. Agric. Sustain* 9, 5–24.

Reisinger, A., & Ledgard, S. (2013). Impact of greenhouse gas metrics on the quantification of agricultural emissions and farm-scale mitigation strategies: A New Zealand case study. *Environmental Research Letters*, 8(2), 25019. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/025019>.

Robinson, W., Polly J., Chesterman S., Worden., J. 2015. Sustainable intensification in drylands: What resilience and vulnerability can tell us. *Agricultural Systems* 135, 133–140.

Romera, A.J., 2004. Simulation of cow-calf systems in the Salado Region of Argentina. PhD Thesis. Massey University, New Zealand. 174p.

Romera, A.J., McCall, D.G., Lee, J.M., Agnusdei, M.G., 2009. Improving the McCall herbage growth model. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 52, 477-494.

Romera, A.J., Morris, S.T., Hodgson, J., Stirling, W.D., Woodward, S.J.R., 2005. Comparison of haymaking strategies for cow-calf systems in the Salado Region of Argentina using a simulation model. 1. Effect of herbage mass at cutting and cow stocking rate under a rigid system of management. *Grass and Forage Science* 60, 399-408.

Rosenzweig, M. 1968. Net primary productivity of terrestrial communities: prediction from climatological data. *American Naturalist* 102:67-74.

Fernández Rosso, C.; Lauric, A. ; de Leo, G.A ; Bilotto, F.; Torres Carbonell, C. ; Machado, C.F., 2018. Modelación productiva, económica y emisión de metano en sistemas de cría vacuna de Bahía Blanca y Coronel Rosales. *RIA* 44 (2) : 129-135.

Rouvier, A.M.; Yáñez, E.A.: Efecto de la ganancia de peso invernal sobre el desarrollo genital de vaquillas a los 18 meses. *Rev. vet.* 28: 2, 93-98, 2017.

Sadras, V., 2002. Interaction between rainfall and nitrogen fertilisation of wheat in environments prone to terminal drought: economic and environmental risk analysis. *Field Crops Res.* 77, 201–215.

Sala, O. E., W. J. Parton, L. A. Joyce, & W. K. Lauenroth. 1988. Primary production of the central grassland region of the United States. *Ecology* 69:40-45.

- Sanson, D. W., "What is the Best Energy Supplement for Thin Cows on Low-Quality Roughages?" (1995). Range Beef Cow Symposium. 194. <http://digitalcommons.unl.edu/rangebeefcowsymp/194>.
- Scoones, I. 1992. Land degradation and communal livestock production in Zimbabwe's communal areas. – *Land Degr. Rehab.* 3: 99–113.
- Seleiman, M.F., Santanen, A., Kleemola, J., Stoddard, F.L. & Mäkelä, P. 2013. Improved sustainability of feedstock production with sludge and interacting mycorrhiza. *Chemosphere* 91: 1236–1242. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.02.004>.
- Seligman, N.G., Noy-meir, I. y Gutman, M., 1989. Bio-economic evaluation of stocking rate and supplementary feeding of a beef herd. *Journal of Range Management* 42: 346-349.
- Senge, P., 2009. La quinta disciplina. El arte y la práctica de la organización abierta al aprendizaje. Ed. Granica 2ª edición, 9ª reimpresión. ISBN 978-950-641-430-6.
- Sharda, V., Handyside, C., Chaves, B., McNider, R.T., Hoogenboom, G., 2017 Transactions of the ASABE. Vol. 60 (6): 2137-2148. American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 2151-0032 <https://doi.org/10.13031/trans.12374>.
- Smeaton, Duncan C., Tim Cox, Suzi Kerr and Robin Dynes. 2011. "Relationships between Farm Productivity, Profitability, N Leaching and GHG Emissions: A Modelling Approach," Proceedings of the New Zealand Grassland Association 73, pp. 57-62. Available online http://www.grassland.org.nz/publications/nzgrassland_publication_1588.pdf
- Smith, A., Snapp, S., Chikowo, R., Thorne, P., Bekunda, M., Gloverd, M., 2017. Measuring sustainable intensification in smallholder agroecosystems: A review. *Global Food Security* 12, 127–138.
- Soussana, J.-F., y Lemaire, G. (2014). Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 190, 9–17. doi:10.1016/j.agee.2013.10.012
- Spedding, C.R.W., 1984. Agricultural systems and the role of modeling. In: "Agricultural ecosystems: Unifying concepts (Lowrance, R., Stinner, B.R. and G.J. House, Eds.)". John Wiley & Sons, New York, USA.
- Stahringer, R.C., Balbuena, O., Kucseva, C.D., Maidana, G., Suarez, L. Niveles de suplementación para incrementar el porcentaje de vaquillas aptas para el servicio de otoño. 4º Simposio Internacional de Reproducción Animal, IRAC, 2001; 285
- Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, Castel V, Rosales M, de Haan C., 2006. Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

- Sterman, J. (2000). *Business dynamics: System thinking and modeling for a complex world*. New York: Irwin/McGraw-Hill.
- Sterman, J. D. 2012. Sustaining Sustainability: Creating a Systems Science in a Fragmented Academy and Polarized World. *Sustainability Science*, 21–58. doi:10.1007/978-1-4614-3188-6_2.
- Stockwell TGH, Smith PC, Stafford Smith DM, Hirst DJ (1991) Sustaining productive pastures in the tropics. 9. Managing cattle. *Tropical Grasslands* 25, 137–144.
- Stritzler, N.P., Petruzzini, H.J., Frasinelli, C.A., Veneciano, J.H., Ferri, C.M. y Viglizzo, E.F. 2007. Variabilidad climática en la región semiárida central argentina. Adaptación tecnológica en sistemas extensivos de producción animal. *Revista Argentina de Producción Animal* 27(2): 111-123.
- Swemmer AM, Knapp AK, Snyman HA (2007) Intra-seasonal precipitation patterns and above-ground productivity in three perennial grasslands. *Journal of Ecology* 95: 780–788.
- Teague, W.R., Grant, W.E., Kreuter, U.P., Diaz-Solis, H., Dube, S., Kothmann, M.M., Pinchak, W.E., Ansley, R.J., 2008. Anecological economic simulation model for assessing fire and grazing management effects on mesquite rangelands in Texas. *Ecological Economics* 64, 611–624.
- Thornthwaite, C.W. y Mather, J.R., 1957. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and water balance. Drexel Institute of technology. Publications in Climatology. Vol. X. Nº 3. 185-311.
- Thornton, P.K., Saka, A.R., Singh, U., Kumwenda, J.D.T., Brink, J.E., Dent, J.B., 1995. Application of a maize crop simulation model in the central region of Malawi. *Experimental Agriculture* 31, 213/226.
- Thornton, P.K., van de Steeg, J., Notenbaert, A., Herrero, M., 2009. The impacts of climate change on livestock and livestock systems in developing countries: A review of what we know and what we need to know. *Agricultural Systems* 101, 113–127.
- Tothill, J.C.; Gillies, C. *The Pasture Lands of Northern Australia: their Condition, Productivity and Sustainability*. 1992. <http://hdl.handle.net/102.100.100/246791?index=1>
- Tilman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R and Polasky S 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418, 671–677.
- Timmer, C., 1997. Farmers and markets: the political economy of new paradigms. *American Journal of Agricultural Economics* 79, 621-627.

- Tojo Soler, C.M., Sentelhas, P.C., Hoogenboom, G. 2007. Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. 2007.
- Tomkins, N.W., McGinn, S.M., Turner D.A., Charmley, E., 2011. Comparison of open-circuit respiration chambers with a micrometeorological method for determining methane emissions from beef cattle grazing a tropical pasture. *Animal Feed Science and Technology* 166– 167, 240– 247.
- Tovihoudji, P.G, Akponikpe, P.B.I, Agbossou, E., Biolders, C., 2019. Using the DSSAT Model to Support Decision Making Regarding Fertilizer Microdosing for Maize Production in the Sub-humid Region of Benin. *Frontiers in Environmental Science*. 7. 10.3389/fenvs.2019.00013.
- Tscharntke, T., Clough Y., Wanger, T, Jackson, L., Motzke, I., Perfecto, I., Vandermeer, J., Whitbread, A., 2012. Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. *Biological Conservation* 151, 53–59.
- Turner, B.L., Rhoades, R.D., Tedeschi, L.O., Hanagriff; R.D., McCuistion, K.C., Dunn, B.H., 2013. Analyzing ranch profitability from varying cow sales and heifer replacement rates for beef cow-calf production using systems dynamics. *Agricultural Systems* 114, 6-14.
- Van de Koppel, J. and Rietkerk, M. 2000. Herbivore regulation and irreversible vegetation change in semi-arid grazing systems. – *Oikos* 90, 253–260.
- Vanlauwe B., Coyne D., Gockowski J., Hauser S., Huising J., Masso C., Nziguheba G., Schut M., Van Asten P. 2014. Sustainable intensification and the African smallholder farmer. *Environmental Sustainability*, 8:15-22. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.06.001>.
- Vega, C.R.C. (Ed.). 2011. Determinación del rendimiento de maíz ante modificaciones en el manejo de la densidad, distancia entre surcos y fecha de siembra. Análisis de campañas 2007-2010 de miembros de MAIZAR en el NOA. Buenos Aires (AR): MAIZAR. Asociación Maíz y Sorgo Argentino. 55 p. Disponible en: <http://www.maizar.org.ar/documentos/maizar%20noa.pdf>.
- Verón S., Jobbágy E., Gasparri, N.I, Kandus, P., Easdale, M., Bilenca, D., Murillo, N., Beltrán, J., Cisneros, J., Lottici, V., Manchado, J., Orúe E., Thompson J. 2011. Valoración de Servicios Ecosistémicos. Conceptos, Herramientas y Aplicaciones para el Ordenamiento Territorial., Cap. 29, Publisher: Ediciones INTA, Editors: Laterra, Jobbágy, Paruelo, pp.260-271.
- Viglizzo, E.F, Lértora, F, Pordomingo, A.J, Bernardos, J.N, Roberto H, Del Valle, Z.E, 2001. Ecological lessons and applications from one century of low external-input farming in the pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 83, Issues 1–2, 65–81.

- Viglizzo, E.F. 2008. Impacto ecológico-ambiental de los cambios en la relación ganadería-agricultura. *Revista Argentina de Producción Animal* 28 (2): 169-172.
- Viglizzo, E.F. 2014. El Noroeste Argentino, ¿una encrucijada ambiental?. *Revista Avance agroindustrial* Vol. 35 N° 1 ISSN 0326 -1131. <http://www.eeaoc.org.ar/mobile/av35-1/v35n1a04.html>.
- Viglizzo, E.F., L.V. Carreño, H. Pereyra, R. F., J. Clatt, D. Pincén, E.G. Jobbágy. 2012. Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental (EF Viglizzo and E. Jobbágy, Eds.). Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina.
- Viglizzo, E.F., Pordomingo, A.J., Castro, M.G., Lértora, F., 2003. Environmental assessment of agriculture at a regional scale in the pampas of Argentina. *Environmental Monitoring and Assessment* 87, 169-195.
- Villarreal, A.O., 2009. Adopción de tecnología en sistemas pecuarios. Tesis de Magister Scientiae. Facultad de Agronomía de Esperanza. UNL. 220p.
- Vogel G. J; Phillips W. A; Horn G. W, Ford M. J, and Mcnew R. W, 1989. Effects of Supplemental Silage on Forage Intake and Utilization by Steers Grazing Wheat Pasture or Bermudagrass. *Journal of Animal Science*. 67: 232-240
- Volante, J.N., Alcaraz-Segura, D., Mosciaro, M.J., Viglizzo, E.F., Paruelo, J.M., 2012. Ecosystem functional changes associated with land clearing in NW Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 154, 12–22.
- Wagner, J.J., K.S. Lusby, J.W. Oltjen, J. Rakestraw, R.P. Wettemann and L.E. Walters. 1988. Carcass composition in mature Hereford cows: estimation and effect on daily metabolizable energy requirement during winter. *Journal of Animal Science* 66(3): 603-612
- Wales, W. J., J. B. Moran and R. W. Harris. 1998. A comparison of growth rates and carcass quality of steers receiving maize silage as a supplement to annual pasture or as a component of a feedlot ration. *Aust. J. Exp. Agric.* 38:1-6.
- Walter, H. 1977. *Zonas de vegetación y Clima*. Ediciones Omega, Barcelona.
- Waugh, C.D., Clark, D.A., Waghorn, G.C., Woodward, S.L., 2005. Feeding maize silage to dairy cows: implications for methane emissions. In: *Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production*, vol. 65, pp. 356–361. <<http://nzsap.org.nz/sap6.html>>
- White A., Snow V.O, King W.McG., 2010. Intensification of New Zealand beef farming systems. *Agricultural Systems* 103, 21–35.

White, L.D., McGinty, A., 1992. Stocking rate decisions. B-5036. Texas Agricultural Extension Service, College Station.

White, L.D., Richardson, C., 1991. How much forage do you have? B-I646. Texas Agricultural Extension Service, College Station.

Wiedemann S., McGahan E., Murphy C., Yan M., Henry B., Thoma G., Ledgard S., 2015. Environmental impacts and resource use of Australian beef and lamb exported to the USA determined using life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production* 94, 67-75.

Williams, T., Hiernaux, P., Fernández-Rivera, S., 2000. Crop-livestock systems in Sub-Saharan Africa: determinants and intensification pathways. In: McCarthy, N., Swallow, B., Kirk, M., Hazell, P. (Eds.), *Property Rights Risk and Livestock Development in Africa*. International Food Policy Research Institute, pp. 132–154.

Yang, J.M., Yang, J.Y., Liu, S., Hoogenboom, G., 2014. An evaluation of the statistical methods for testing the performance of crop models with observed data. *Agricultural Systems* 127, 81-89.

Anexo 1

Calibración y evaluación del modelo DSSAT

La variabilidad en las precipitaciones es una de las principales fuentes de riesgo para la producción agrícola en la región del Chaco semiárido, especialmente bajo condiciones de secano. Distintos modelos de simulación pueden ser utilizados para estimar rendimientos en condiciones potenciales y de secano (Grassini *et al.*, 2011a; Laborte *et al.*, 2012). Entre los más utilizados se encuentra el modelo DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) creado con el objetivo de facilitar el uso de modelos de simulación agrícola en el ámbito de la investigación (Jones *et al.*, 2003). DSSAT es un paquete informático que incorpora a CERES-Maize para la simulación del cultivo del maíz (e.g. desarrollo fenológico, tasas de crecimiento, rendimiento) (Jones *et al.*, 1986). La base del cálculo para la producción de materia seca se realiza a través del producto de la tasa de crecimiento y la duración de cada fase de desarrollo, la cual es controlada por la temperatura ambiental y el fotoperiodo (Tojo Soler *et al.*, 2007). Las salidas son el resultado de las interacciones generadas por el ambiente, el genotipo y las estrategias de manejo utilizadas (Jones *et al.*, 2003). Desde su creación, DSSAT-CERES-Maize ha sido evaluado a nivel mundial en múltiples entornos y condiciones de manejo (Liu *et al.*, 2013; Nouna *et al.*, 2000; Tovihoudji, *et al.* 2019) e incorporado para evaluar el impacto de la variabilidad climática sobre la producción agrícola (Thornton *et al.*, 1995; Phillips *et al.*, 1998; Jones y Thornton, 2003; Tojo Soler *et al.*, 2007; Ngwira *et al.*, 2014; Sharda *et al.*, 2017). En Argentina, investigaciones precedentes utilizando el modelo DSSAT se han realizado principalmente para la región central del país (Paruelo y Salas, 1993; Ferreyra *et al.*, 2001; Magrin *et al.*, 2005; Bert *et al.*, 2007).

Con el propósito de estimar el rendimiento de maíz en condiciones de secano y en el contexto de la variabilidad climática característica de la región semiárida del noroeste del país, se calibró y evaluó el modelo de simulación DSSAT v.4.5 (Hoogenboom *et al.*, 2012). En ambos casos fue necesario contar con el conjunto mínimo de datos meteorológicos que requiere DSSAT tales como, los valores diarios de radiación solar, temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación (Jones *et al.*, 2003). La calibración consistió principalmente en adaptar los parámetros del modelo a las condiciones ambientales locales. Para tal fin, se utilizó un set de datos que contaba con rendimientos logrados a campo, precipitación acumulada en el ciclo del cultivo, densidad de siembra, tipo de suelo, y fecha de siembra. Los datos meteorológicos requeridos por el modelo fueron obtenidos de las estaciones automáticas más cercanas. Para la simulación de aspectos de crecimiento y desarrollo se utilizaron los coeficientes para maíz propuestos por Mercau *et al.* (2001) (Cuadro 2.2). La fecha de cosecha fue programada para efectuarse alcanzado el estado de madurez del grano. Una vez que el modelo fue

calibrado se procedió a la evaluación del mismo, utilizando en ambos casos los desvíos estadísticos propuestos por Yang *et al.* (2014) (Cuadro 2.3). Además, se incluyó la colaboración de un experto, quien controló la consistencia de las salidas del modelo siguiendo las recomendaciones establecidas por Cros *et al.*, (2004); Martin *et al.*, (2011); Chardon *et al.*, (2012).

Cuadro 2.2.: Valores calibrados de coeficientes genéticos para el cultivar usado para evaluar CERES-Maize en condiciones a campo (Mercau *et al.*, 2001).

| Coeficiente | | Valor calibrado | |
|-------------|---|-----------------|-----|
| P1 | Grados días emergencia-fase juvenil | Grados días | 255 |
| P2 | Sensibilidad al fotoperiodo (valor entre 0-1) | Días/horas | 0 |
| P5 | Grados días R1- madurez fisiológica | Grados días | 840 |
| N° GR | N° potencial de granos | Granos/planta | 755 |
| T LL | Tasa de llenado | Mg/día | 6 |
| FIL | Filocrono | Grados días | 45 |

Para la evaluación del modelo, se utilizó un set de datos independiente a la calibración. Los datos de rendimiento de maíz utilizados para evaluar el modelo comprendieron ensayos a campo (macroparcelas) sembrados con los híbridos comúnmente utilizados en la región. Las macroparcelas abarcaron 21 localidades del noroeste argentino correspondientes a las provincias de Tucumán, Chaco y Santiago del Estero (Figura 2.4) (EEAOC, 2007-2012; EEA INTA Las Breñas; EEA INTA Quimili). En todos los casos se respetaron las reglas de manejo utilizadas en las macroparcelas (e.g. fecha de siembra, tipo de suelo, densidad de plantas). En el análisis fue contemplada la variabilidad espacial y temporal de los rendimientos. Las fechas de siembra consideradas variaron entre el 17 de Diciembre y el 4 de Febrero. El conjunto de datos meteorológicos utilizados incluyó distintas fuentes (Instituto de Clima y Agua – INTA Castelar y Servicio Meteorológico Nacional).

Cuadro 2.3: Desvíos estadísticos propuestos para la evaluación empírica de los modelos de simulación. Donde y_i valores simulados, x_i valores observados, n número de casos, \bar{x} media de datos observados.

| Desvío Estadístico | |
|---|---------------------------------------|
| Error medio (ErM) | $ErM = \sum(y_i - x_i) / n$ |
| Raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) | $RMSE = \sqrt{\sum(y_i - x_i)^2 / n}$ |
| RMSE relativa (RMSE%) | $nRMSE = (RMSE / \bar{x}) * 100$ |

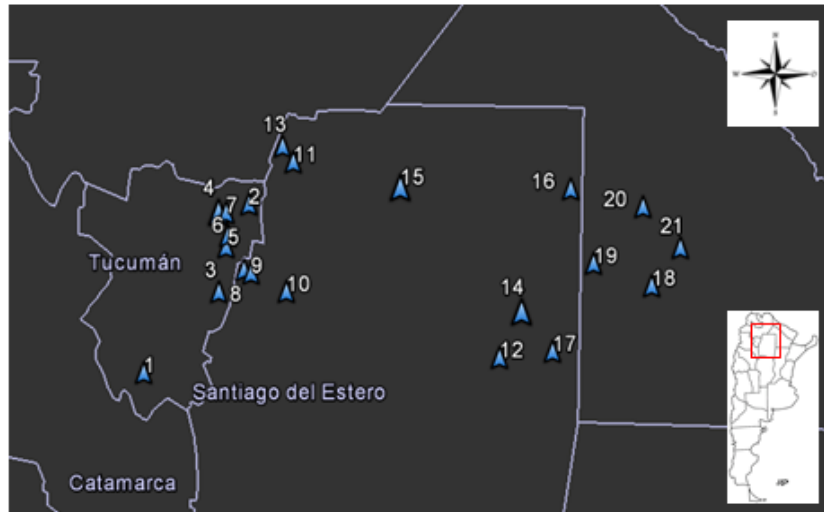


Figura 2.4. Localidades incorporadas para la evaluación de DSSAT en el noroeste argentino. 1. La Cocha, Tucumán. 2. El Azul, Tucumán. 3. Viclos, Tucumán. 4. La Cruz, Tucumán. 5. La Virginia, Tucumán. 6. Monte redondo, Tucumán. 7. Piedra Blanca, Tucumán. 8. Javicho, Santiago del Estero. 9. Isca Yacu, Santiago del Estero. 10. Palos quemados, Santiago del Estero. 11. Nueva esperanza, Santiago del Estero. 12. Quimili, Santiago del Estero. 13. La fragua, Santiago del Estero. 14. Otumpa, Santiago del Estero. 15. La paloma, Santiago del Estero. 16. Coronel rico, Santiago del Estero. 17. Roversi, Santiago del Estero. 18. Las breñas, Chaco. 19. Tres estacas, Chaco. 20. Pampa del infierno, Chaco. 21. Campo largo, Chaco.

Los resultados obtenidos en la evaluación general de DSSAT y en función de los rangos sugeridos por Jamieson *et al.* (1991), demostraron un muy buen desempeño del modelo para estimar el rendimiento del cultivo de maíz con un RMSE (expresado en porcentaje) cercano al 10% y un valor de RMSE de 679 kg.ha⁻¹. El valor de RMSE% resulta próximo al reportado en la validación de otros modelos predictivos del rendimiento del cultivo de maíz (Otegui *et al.*, 1996; Guevara *et al.*, 1999; Mercau *et al.*, 2001; Maddonni *et al.*, 2004). Los valores simulados de rendimiento entre las distintas localidades variaron entre 5202 y 7644 Kg.ha⁻¹ y los observados entre 4912 y 8045 Kg.ha⁻¹. El desempeño particular para cada una de las localidades incorporadas en el estudio se observa en el Cuadro 2.4.

Cuadro 2.4: Resultados de los desvíos estadísticos (RMSE, RMSE relativo, ErrM) utilizados para evaluar las salidas del modelo DSSAT en función de los datos de rendimiento promedio (Kg.ha⁻¹) observados a campo para cada localidad del norte argentino incorporada en el estudio.

| | rendimiento observado | rendimiento simulado | RMSE Kg.ha ⁻¹ | RMSE (%) | ErrM |
|-------------|-----------------------|----------------------|--------------------------|----------|------|
| La Cocha | 6806 | 7104 | 700 | 10,3 | 298 |
| La Cruz | 4912 | 5202 | 459 | 9,3 | 290 |
| El Azul | 6732 | 6288 | 800 | 11,9 | -444 |
| La Virginia | 6160 | 6647 | 684 | 11,1 | 488 |

| | | | | | |
|--------------------|------|------|------|------|-------|
| Monte Redondo | 7452 | 7165 | 313 | 4,2 | -288 |
| Piedra Blanca | 7347 | 6589 | 758 | 10,3 | 1166 |
| Viclos | 6601 | 6507 | 1159 | 17,6 | -95 |
| Javicho | 6476 | 6029 | 1209 | 18,7 | -446 |
| Isca Yacu | 6096 | 6910 | 814 | 13,4 | 814 |
| Palos Quemados | 5795 | 6408 | 613 | 10,6 | 613 |
| Nueva Esperanza | 7230 | 7210 | 20 | 0,3 | -20 |
| Quimili | 7339 | 5700 | 1639 | 22,3 | -1639 |
| La Fragua | 7661 | 6249 | 1412 | 18,4 | -1412 |
| Otumpa | 8045 | 7644 | 401 | 5,0 | -401 |
| La Paloma | 5865 | 6405 | 540 | 9,2 | 540 |
| Coronel rico | 6548 | 7067 | 519 | 7,9 | 519 |
| Roversi | 6787 | 6519 | 268 | 3,9 | -268 |
| Las Breñas | 6362 | 6014 | 1126 | 17,7 | -348 |
| Tres estacas | 6228 | 7485 | 1257 | 20,2 | 1257 |
| Pampa del Infierno | 7223 | 6520 | 703 | 9,7 | -703 |
| Campo Largo | 5723 | 6626 | 903 | 15,8 | 903 |
| Promedio | 6638 | 6585 | | | |

RMSE: raíz cuadrada del cuadrado medio del error. **RMSE%:** raíz cuadrada del cuadrado medio del error relativo. **ErrM:** error medio. Valores estimados y observados iguales, corresponden a $RMSE = 0$. Valores de RMSE % menores al 10 % expresan un ajuste excelente; mayor a 10% y menor a 20% el ajuste es bueno; mayor a 20% y menor a 30% el ajuste es aceptable y mayor a 30% el ajuste es pobre (Jamieson *et al.*, 1991). Valores de ErrM ($E > 0$) indican tendencia del modelo a sobreestimar, y ($E < 0$) a subestimar.

Estimaciones realizadas en varias localidades de la región indican que sin limitaciones hídricas, nutricionales y bióticas los rendimientos potenciales de maíz (predominantemente de germoplasma tropical, o tropical*templado) se ubican cerca de 10 (Orán) y 14 tn.ha⁻¹ (Tucumán), mientras que los rendimientos promedio alcanzados se encuentran alrededor de 5-6 tn.ha⁻¹ (Vega, 2011) por lo que los valores obtenidos mediante la simulación refuerzan la capacidad de DSSAT 4.5 para estimar rendimiento. En relación al desarrollo del cultivo y en base a los valores citados en la bibliografía (Otegui y Savin, 2006) los resultados sugieren que las fechas desde emergencia a antesis y madurez fisiológica en general fueron simuladas con robustez, con valores promedio de 56 días (DE $\pm 6,3$ días) y 88 días (DE $\pm 24,2$ días) respectivamente. Contemplando el valor del error medio (ErrM) es posible observar una leve tendencia a subestimar los rendimientos obtenidos (Yang *et al.*, 2014).

