



# 4

DOCUMENTOS  
DE TRABAJO

WORKING  
PAPERS

## Ajustes al índice de potencialidad agrícola de Turc para lograr mejores diseños de los mecanismos para compartir beneficios en los Andes

Rubén Darío Estrada

Octubre de 2011



Este documento es el resultado del proyecto *AN1 – On Designing and Implementing Benefit-Sharing Mechanisms* que Rimisp lleva a cabo en Bolivia, Colombia and Ecuador en colaboración con varios socios. El programa cuenta con el auspicio del CGIAR Challenge Program on Water and Food. Se autoriza la reproducción parcial o total y la difusión del documento sin fines de lucro y sujeta a que se cite la fuente.

This document is the result of the *AN1 – On Designing and Implementing Benefit-Sharing Mechanisms* project, implemented by Rimisp in Bolivia, Colombia and Ecuador. The program has been supported by the CGIAR Challenge Program on Water and Food. We authorize the non-for-profit partial or full reproduction and dissemination of this document, subject to the source being properly acknowledged.

Cita/Citation:

Estrada, Rubén Darío. 2011. “Ajustes al índice de potencialidad agrícola de Turc para lograr mejores diseños de las mecanismos para compartir beneficios en los Andes”. Documento de trabajo nº2 Proyecto Agua en Los Andes: Compartiendo Beneficios. Rimisp, Santiago, Chile.

El autor es el líder del proyecto e investigador de Rimisp – Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural.

© Rimisp – Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural

Rimisp  
Casilla 228-22  
Santiago, Chile  
Tel +(56-2) 236 45 57  
[www.rimisp.org/agua](http://www.rimisp.org/agua)



## Tabla de contenido

Abstract .....	4
Resumen.....	6
2. Factores climáticos propuestos por Turc .....	9
2.1. Factor térmico( $F_t$ ).....	9
2.2. Factor solar( $F_h$ ) .....	9
2.3. Factor se sequedad( $F_s$ ).....	11
3.Propuesta del proyecto AN1 para ajustar la producción de biomasa y grano con las variables climáticas propuestas por Turc .....	13
3.1. Factores térmicos( $F_t$ ) .....	13
3.2. Factor Solar (parámetro R).....	15
3.3. Factor sequedad ( $F_s$ ) .....	18
4. Ajuste por uso de fertilizantes .....	20
5. Ajustes requeridos para estimar adecuadamente la producción de pasturas y la adaptación que pueden aportar los Andes ante el cambio climático.....	20
6. Conclusiones.....	24
Bibliografía .....	26



## Lista de figuras

Figura 1. Relación entre el valor del multiplicador térmico del índice de Turc y los TT

Figura 2. Relación entre grados días acumulados y la producción de biomasa

Figura 3. Intensidad de la radiación en las montañas europeas

Figura 4. Relación entre la asimilación y la radiación fotosintéticamente activa en Loma Redonda y Mucubaji, en la estación húmeda (superior) y la estación seca (inferior)

Figura 5. Evapotranspiración de referencia

Figura 6. Eficiencia del maíz en la utilización de agua y nitrógeno

## Abstract

### Modification of Turc index of agricultural potential for estimation of the benefits of water resources in the Andes

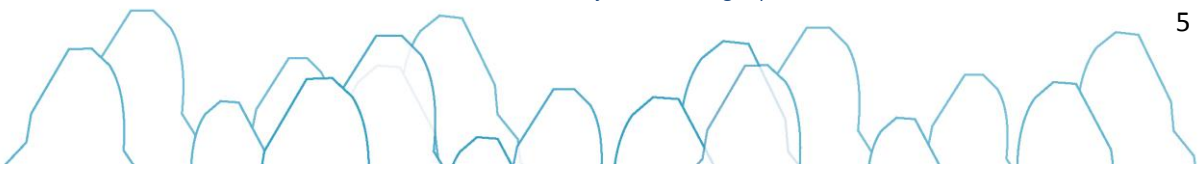
Abstract author: Allan Jones, Professor, Texas A&M University

The benefits water provides to society through crop production can best be understood through a detailed analysis of the relationship between crop water use and income from crop production with, in most cases, crop prices being determined by the market for agricultural products. Of course, this analytical framework requires a clear understanding of the relationship between crop water use and crop productivity. In the Andean region, temperatures and precipitation amounts vary spatially and temporally throughout the year. As a result, it is possible to grow crops in a variety of locations and seasons across the mountainous landscape. Therefore, it is important for the analytical framework to capture the spatial and temporal aspects of crop production.

In 1967, Turc suggested an index (the Turc Index) that predicts monthly crop productivity per hectare through integration of three climatic variables: temperature, radiation, and water availability (drought stress). Turc compared his index with actual crop yields at the field level in Spain, and by estimating the value of the index for other regions he was able to predict productivity. However, information on monthly crop productivity is not generally available for the Andean region. Therefore, we have created physiologically based algorithms to estimate productivity of several crops from monthly climatic variables.

In order for our methodology to be useful in the Andean region, it should be more accurate than the original Turc Index. To increase its accuracy in the Andes, we have made three adjustments to Turc's methodology. The first adjustment consists of estimating Thermic Time (TT) required by each crop for its phenological development. The second adjustment consists of quantifying the effect of intercepted photosynthetically active radiation (PAR) on biomass production by each crop, taking into consideration its glucose, starch, protein, and oil contents. The third adjustment quantifies the relationship between dry matter production and crop water use (evapotranspiration).

This paper discusses adjustments to Turc's original methodology needed to adapt it to Andean conditions. It also discusses other crop-specific considerations, including soil erosion protection, rooting depth, response to rotational grazing or harvesting, resistance to frost, response to grazing intensity, radiation levels at which photosynthesis is saturated, use for hay production, use of pasture as a substitute for concentrated feeds, and crop fertilizer requirements. Taking these factors into consideration, alfalfa is the best indicator of potential crop productivity for the Andean region, and the modified crop productivity index we present provides an accurate and rapid means of estimating its monthly productivity in different ecological niches in the Andes.



## Resumen

### **Ajustes al índice de potencialidad agrícola de Turc para lograr mejores diseños de los mecanismos para compartir beneficios en los Andes**

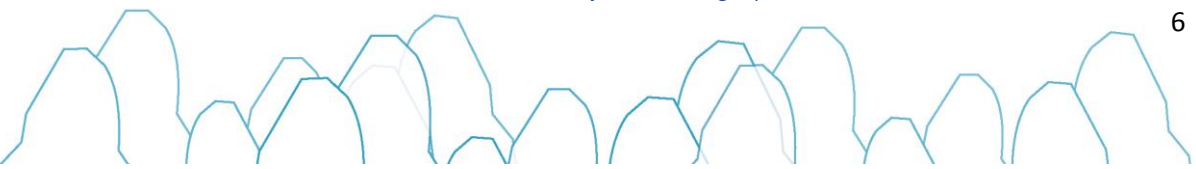
En teoría, el diseño para compartir beneficios relacionados con agua no tendría que ver, necesariamente, con una comprensión detallada de cómo se generan estos beneficios espacial y temporalmente. Lo que sostiene este documento es que sí es necesario relacionar los dos aspectos pues la mayoría de los casos el mecanismo para compartir los beneficios va a ser el mercado y en estos casos un conocimiento detallado del trade-off entre productividad agropecuaria y balance hídrico se convierte en la mejor herramienta para diseñar alternativas que le permita a la población objetivo capturar beneficios.

Si se acepta esta premisa, se requiere un mecanismo que relacione, en forma espacial y temporal, la utilización del agua con la productividad agropecuaria. Turc propuso en 1967 el índice de Turc, que a través de la integración de tres variables climáticas (temperatura, radiación y sequedad) predecía la productividad mensual por hectárea. Para tal fin comparaba el índice con la productividad real obtenida a nivel de campo y estimando el índice para las demás regiones predecía su productividad.

En los Andes no se dispone de esta información mensual de productividad que permita validar el índice. Por lo tanto, es necesario generar un mecanismo que realice una primera aproximación razonable a la productividad a través de las variables climáticas. Para tal fin, se utilizan modelos fisiológicos de cultivos que también predicen la productividad.

Para poder hacer una buena aproximación a la productividad, la metodología desarrollada debe ser más precisa que el índice de Turc y, por lo tanto, requiere hacer algunos ajustes en los Andes. El primer ajuste consiste en trabajar con tiempos térmicos (TT) por especie y no con temperaturas absolutas. El segundo es utilizar la radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada, determinar la saturación por radiación de cada especie y estimar la producción de biomasa de cada especie con base en su calidad (contenidos de glucosa, almidón, proteína y aceite). El tercer ajuste es determinar el consumo de agua por especie con base en su producción de materia seca de biomasa.

El presente artículo analiza el índice de Turc y presente los ajustes que se están realizando para precisar variables climáticas y los modelos fisiológicos de producción en los Andes.



## 1. Antecedentes

En el 2010 el Challenge Program for Water and Food (CPWF) encargó a RIMISP el desarrollo de una metodología rápida y eficiente que permitiera barrer 10 millones de hectáreas en los Andes para estimar en forma ex-ante el potencial de compensación por externalidades ambientales y que dicha compensación fuera un elemento clave en la reducción de la pobreza. Esto implicaba tener un índice de potencial agrícola por sitio, como base sobre la cual se podría agregar pasos sucesivos para determinar la rentabilidad privada y social, la competitividad y los encadenamientos de ingreso y empleo, elementos claves para determinar el trade-off privado y social entre el precio sombra del productor y del consumidor del agua. Esto permitiría evaluar cuál es el impacto en pobreza cuando los productores pobres de las partes altas utilizan su propia agua o la dejan pasar, esperando una compensación de los productores de las partes bajas, que tienen mayores niveles de productividad.

Las aproximaciones que tradicionalmente se han utilizado para diseñar mecanismos para compartir beneficios por agua se basan en modelos hídricos que señalan el aporte de agua al caudal de cada unidad de respuesta hidrológica. La aproximación que se está diseñando sigue la misma lógica, pero prioriza la producción de biomasa sobre el balance hídrico. Este diseño parece ser más funcional, pues en los Andes la productividad de los cultivos depende sustancialmente de los tiempos térmicos y éstos se van modificando sustancialmente con la altura, teniendo gran impacto en la utilización del agua a través de la evapotranspiración. Una visión espacial de la producción actual y de la potencial, ofrece elementos de juicio para decidir rápidamente cuál es el factor limitante (temperatura, radiación, agua) y cómo sería el cambio en eficiencia de uso de agua, cuando los otros factores permiten cambiar la productividad. Este aspecto es fundamental para entender qué debe hacer el productor pobre. Aumentar la productividad incrementando la evapotranspiración o dejar pasar el agua para que sea utilizada en las partes bajas, recibiendo una compensación por su aporte. Los demás modelos de cuenca no consideran estos cambios en productividad por altitud pues están diseñados para responder más por condicionantes de latitud.

Para ser eficiente en el proceso se requiere desarrollar una metodología de fácil aplicación y que determine la relación entre las variables climáticas y la producción. Turc (1967) generó esta metodología. Con base en variables climáticas desarrolló el índice de Turc y lo comparó con los niveles de productividad obtenidos, en el mismo tiempo, en unos 500 sitios en España. Con esta relación productividad-índice podría predecir la producción esperada en cualquier período y predecir en forma específica cómo variaría la producción de un terreno, en cualquier sitio de del hemisferio norte, cuando pasaba de secano a riego. El índice de Turc está siendo utilizado por las compañías de seguro para establecer las primas anuales y, por lo tanto, se acepta que es un buen indicador de la variabilidad de la producción.

El índice de Turc se calcula como el producto de tres factores estimados mes a mes: el térmico, el solar y la sequedad. Esta aproximación mensual se agrupa para la época de secano y regadío. El índice de Turc sigue vigente después de tantos años, con pequeños ajustes. Méndez *et al*(2003), estimaron los rendimientos de alfalfa para toda España para las compañías de seguro. Se utilizaron 482 observaciones entre 1979 y 1995. El índice de Turc explicó el 87 % de la varianza y un solo componente, el factor de sequedad, explicó el 73 % de la variabilidad, lo que muestra la gran dependencia del déficit hídrico en la agricultura mediterránea. Este estudio es fundamental pues la evapotranspiración potencial de referencia, en la mayoría de los casos, es estimada con base en los cultivos de alfalfa.

Versiones modificadas del índice de Turc han sido aplicadas por varios investigadores en los países andinos para cultivos como caña (Estrada,2007), palma de aceite(Estrada, 2008), maíz, sorgo de alta densidad energética, pasturas y soya (Estrada, 2011). Las pasturas son los cultivos mas difíciles para predecir su producción por ser cultivos permanentes, por el manejo que le puede dar el productor (pastoreo continuo hasta rotacional), por los niveles de fertilización (0 -1000 kg/ha/año de N), por los días de ocupación y descanso de la pastura. Todo esto tiene incidencia en el índice de área foliar, la captura de radiación, la eficiencia fotosintética, los niveles de proteína y digestibilidad de la materia seca y la eficiencia en el uso del agua. Tienen especial importancia cuando se utilizan forrajes de alta calidad para sustituir concentrados pues cambian sustancialmente el precio sombra del producto (Estrada, 2011).

El índice de Turc ha funcionado en la agricultura mediterránea. Ha sido ratificado como base para estimar las primas de seguro en España y para estimar el potencial para producir biocombustibles. ¿Podría también funcionar en los Andes? Vacher (2003) lo utilizo en el altiplano de Bolivia y fue el que predijo en mejor forma la evapotranspiración potencial con base en temperatura y radiación. Sin embargo, esta fue sobreestimada en más de 30%, en la época de producción agrícola. Baigorria *et al* (2004) mostraron la gran variación (0,44 a 0,71) que existe en los Andes entre los índices de correlación entre la amplitud de temperatura diaria y los niveles de radiación y productividad. Colmenares (2003) mostró los niveles de radiación fotosintéticamente activa a 3500 y 4100 msnm en los Andes venezolanos y la eficiencia fotosintética alcanzada en la época de lluvias y de sequía. Todos estos elementos llevan a reconocer que su aplicación es más compleja en los Andes que en los países templados.

El presente artículo discute los ajustes realizados al índice de Turc para que sea aplicable en los Andes, y plantea la necesidad de desarrollar una nueva metodología para mirar los balances hídricos en pasturas andinas y el impacto que esto tendría en la eficiencia del uso del agua. Las pasturas cubren aproximadamente el 80 % de los Andes y los cultivos semestrales tienen incluida la rotación con pasturas como una práctica común. Si no se resuelve el potencial de producción de las pasturas y su eficiencia en el uso del agua, se tendrán





aproximaciones débiles en los índices globales de productividad y uso del agua y, por lo tanto, será muy difícil mirar el impacto de la eficiencia en el uso del agua en pobreza.

## 2. Factores climáticos propuestos por Turc

El índice de Turc se calcula como el producto de tres factores estimados mes a mes: el térmico, el solar y la sequedad. Esta aproximación mensual se agrupa para la época de secano y regadío. A continuación se describen los pasos propuestos por Turc para ajustar las variables climáticas, en los tres factores mencionados. Según Almorox (2001) los principales ajustes son:

### 2.1. Factor térmico( $F_t$ )

Se calcula mediante alguna de las tres fórmulas siguientes, dependiendo de la temperatura media de la mínima del mes:

$F_t = [tm \cdot (60 - tm) / 1000] \cdot [(t - 1) / 4]$ si $1 < t < 5$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>tm</math>: temperatura media del mes (<math>^{\circ}C</math>). <math>F_t</math> será máximo cuando <math>tm = 30^{\circ}C</math></li> <li>• <math>t</math>: temperatura media de la mínimas del mes (<math>^{\circ}C</math>)</li> </ul>
$F_t = 0$ si $t \leq 1$	
$F_t = tm \cdot (60 - tm) / 1000$ si $t \geq 5$	

### 2.2. Factor solar( $F_h$ )

$F_h$  es el menor de los valores obtenidos en las siguientes fórmulas, siempre que sea positivo; de lo contrario se toma el valor cero y el mes sería improductivo:

$F_{h1} = Nm - 5 - (\Phi/40)^2$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>Nm</math>: insolación máxima (h/día). A partir de tablas</li> <li>• <math>\Phi</math>: latitud (<math>^{\circ}</math>)</li> <li>• <math>R</math>: Radiación solar en el suelo (<math>cal/cm^2 \cdot día</math>)</li> </ul>
$F_{h2} = 0,03 \cdot (R - 100)$	

El parámetro  $Nm$  se puede obtener de la siguiente tabla, en la que la primera columna se refiere a la latitud Norte:

Lat. N ( $^{\circ}$ )	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
25	10,8	11,4	12,0	12,7	13,4	13,7	13,6	13,0	12,2	11,4	10,9	10,6
26	10,7	11,3	12,0	12,7	13,4	13,8	13,6	13,0	12,2	11,4	10,9	10,6

27	10,7	11,3	12,0	12,8	13,5	13,8	13,7	13,1	12,2	11,4	10,8	10,4
28	10,6	11,3	12,0	12,8	13,5	13,9	13,7	13,1	12,4	11,3	10,8	10,4
29	10,6	11,2	12,0	12,8	13,6	13,9	13,8	13,1	12,4	11,3	10,8	10,3
30	10,5	11,2	12,0	13,0	13,7	14,0	13,9	13,2	12,4	11,3	10,7	10,2
31	10,5	11,2	12,0	13,0	13,7	14,2	13,9	13,2	12,4	11,3	10,7	10,2
32	10,3	11,1	12,0	13,0	13,8	14,3	14,0	13,3	12,4	11,3	10,6	10,1
33	10,2	11,1	12,0	13,1	13,8	14,4	14,2	13,3	12,4	11,2	10,6	10,0
34	10,2	10,9	12,0	13,1	13,9	14,4	14,2	13,5	12,4	11,2	10,4	10,0
35	10,1	10,9	12,0	13,1	14,0	14,5	14,3	13,5	12,4	11,2	10,3	9,9
36	10,1	10,9	12,0	13,2	14,0	14,6	14,4	13,5	12,4	11,2	10,3	9,8
37	10,0	10,8	12,0	13,2	14,2	14,7	14,5	13,6	12,4	11,2	10,2	9,6
38	9,9	10,8	12,0	13,2	14,3	14,9	14,5	13,6	12,5	11,0	10,1	9,6
39	9,9	10,8	12,0	13,3	14,3	14,9	14,6	13,7	12,5	11,0	10,1	9,5
40	9,8	10,7	12,0	13,3	14,4	15,0	14,7	13,7	12,5	11,0	10,0	9,4
41	9,6	10,7	12,0	13,3	14,5	15,1	14,7	13,8	12,5	11,0	9,8	9,3
42	9,5	10,7	12,0	13,4	14,6	15,2	14,9	13,8	12,5	10,9	9,8	9,2
43	9,4	10,5	11,8	13,4	14,6	15,4	15,0	13,9	12,5	10,9	9,7	8,9
44	9,4	10,5	11,8	13,6	14,7	15,5	15,1	13,9	12,5	10,9	9,6	8,8
45	9,3	10,4	11,8	13,6	14,9	15,5	15,2	14,0	12,5	10,8	9,5	8,7

El parámetro R viene definido mediante la siguiente expresión:

$$R = R_A \cdot (0,18 + 0,62 \cdot ne / Nm)$$

En donde:

- ne: insolación eficaz (horas sol/día)
- R<sub>A</sub>: radiación solar global (cal/cm<sup>2</sup>-día)

R<sub>A</sub> se puede extraer de la siguiente tabla, que recoge los valores mensuales de radiación global en Langley ( 1 cal/cm<sup>2</sup>):

Lat. N (º)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
20	642	732	834	902	930	934	930	902	843	755	656	610
21	629	722	827	900	932	938	932	901	837	746	643	596
22	616	711	820	898	934	942	935	900	832	736	631	582

23	602	700	813	895	936	946	937	899	826	727	619	567
24	589	689	806	893	938	950	940	897	821	718	606	553
25	575	678	799	891	940	954	942	896	815	708	593	539
26	562	667	792	889	942	958	945	895	810	698	580	525
27	548	657	785	886	944	962	948	894	804	688	567	511
28	535	646	778	884	946	965	950	893	799	678	554	497
29	521	635	771	882	948	968	952	892	793	668	541	483
30	508	624	764	880	950	972	955	891	788	658	528	469
31	493	611	755	875	949	973	955	888	780	646	514	454
32	479	598	746	871	949	974	956	884	772	634	500	439
33	464	585	737	866	948	976	956	881	764	622	486	424
34	450	572	728	861	948	977	956	878	757	609	473	410
35	436	559	719	856	947	979	957	874	749	597	459	395
36	422	547	709	851	947	980	957	871	741	585	445	381
37	407	534	700	846	946	981	957	868	734	573	432	366
38	393	521	691	842	945	983	958	865	726	560	418	352
39	378	508	682	837	945	984	958	861	718	548	404	337
40	364	495	673	833	944	985	958	858	710	536	390	323
41	350	481	662	826	942	985	956	852	700	523	375	309
42	336	468	650	819	939	985	954	846	689	510	360	294
43	322	454	639	812	936	984	952	840	679	497	346	280
44	307	441	628	805	934	984	950	834	668	484	331	266
45	293	427	616	798	932	984	948	/29	658	470	317	251
46	279	414	605	791	929	984	946	823	648	457	303	237
47	265	400	594	784	927	983	944	817	637	444	289	223
48	250	387	582	778	925	983	942	812	627	430	274	209
49	236	373	571	771	922	983	940	806	617	417	260	194
50	222	360	560	764	920	983	938	800	607	404	246	180

### 2.3. Factor se sequedad(Fs)

Para el cálculo de este factor es necesario plantear un balance hídrico, en el que se necesitarán los siguientes datos:

- P: precipitación media mensual
- ETP: evapotranspiración potencial (Turc)
- R: reserva
- VR: variación de la reserva



- ETR: evapotranspiración real
- F: falta

En donde la evapotranspiración potencial, según Turc, calculada mes a mes se obtiene mediante la siguiente expresión:

$ETP = f \cdot (t_m / t_m + 15) \cdot (R + 50) \cdot C$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• f: factor de corrección mensual, 0,37 para febrero y 0,4 para el resto</li> <li>• <math>t_m</math>: temperatura media mensual (°C)</li> <li>• R: radiación solar media medida en el suelo. (/cm<sup>2</sup>·día)</li> <li>• C: factor de corrección para zonas áridas en función de la humedad relativa (hr):             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ C = 1 si hr &gt; 50 %</li> <li>○ C = [(50 - hr) / 70] si hr &lt; 50 %</li> </ul> </li> </ul>
---	--

Turc también plantea una ecuación para calcular la evapotranspiración real anual:

$$ETR = P / \sqrt{0,9 + P/L^2} \text{ (mm/año)}$$

- P: precipitación total anual (mm)
- $L = 300 + 25T + 0,05T^3$  (T: temperatura media anual en °C)

Para determinar el factor de sequedad ( $F_s$ ) correspondiente a cada mes se pueden seguir los siguientes pasos:

- Se toma el menor valor entre los de ETP y la expresión  $(0,3 \cdot ETP + 50)$ . A este valor se le denominará X.
- Se calcula  $[(X - F) / X] + rep$ ; donde "F" es la falta del mes hallada en el balance hídrico y "rep" es el report del mes precedente. Los cálculos para determinar el report se inician en el último mes con  $(X - F) / X = 1$ , en el que  $rep = 0$ . A partir de ahí:
  - Si  $[(X - F) / X] + rep > 0$ , el rep del mes siguiente toma valor 0.
  - Si  $-1 \leq [(X - F) / X] + rep \leq 0$ , el rep del mes siguiente toma el valor de  $[(X - F) / X] + rep$ .
  - Si  $-1 > [(X - F) / X] + rep$ , el rep del mes siguiente toma valor -1.
- Por último sólo queda obtener el valor de  $F_s$ . Existen dos posibilidades:
  - $F_s = 0$  si  $[(X - F) / X] + rep < 0$
  - $F_s = [(X - F) / X] + rep$  si  $[(X - F) / X] + rep \geq 0$ .

### 3.Propuesta del proyecto AN1 para ajustar la producción de biomasa y grano con las variables climáticas propuestas por Turc

En la propuesta del proyecto AN1 se consideran las mismas variables utilizadas por Turc pero se modifican para que, cada una de ellas, explique por sí sola la producción total de biomasa y grano. Esto permite hacer estimaciones sucesivas de producción asumiendo que las demás variables climáticas no son limitantes hasta que se consideran explícitamente. La secuencia en que van entrando las variables se presenta a continuación. Siguen el modelo propuesto por Chapman y Lemaire (1993) para estimar la producción de pasturas.

#### 3.1. Factores térmicos(Ft)

La aproximación de Turc propone tres factores multiplicadores para diferentes niveles de temperatura medias mínimas del mes ( $t_m$ ). Si la  $t_m < 1$  °C el factor multiplicador es cero pues no existe ninguna planta que pueda producir hojas con estos niveles de temperatura. Si la  $t_m$  esta entre 1 y 5 grados, Turc propone un multiplicador dado por la formula  $F_t = [t_m \cdot (60 - t_m) / 1000] \cdot [(t_m - 1) / 4]$  que en términos prácticos significa que con temperaturas de 5 grados se puede lograr el 27,5 % del potencial de producción. Si la  $t_m$  es mayor 5°C el factor de multiplicación es una función lineal ( $F_t = t_m \cdot (60 - t_m) / 1000$ ) hasta lograr los 30 °C donde obtiene el 90 % del potencial de producción.

La propuesta del proyecto AN1 es utilizar los tiempos térmicos (TT) acumulados mensualmente. Los TT vienen dados por la siguiente expresión  $((t_{ma} + t_{mi}) / 2) - t_b$ , donde  $t_{ma}$ = temperatura máxima,  $t_{mi}$ = temperatura mínima,  $t_b$ = temperatura necesaria para que la planta emita las hojas (Oregon Department of Agriculture, 1998). Esto proporciona mucho más precisión al análisis pues la temperatura base varía de 0 a 10 °C en los cultivos y pasturas que se siembran en los Andes (ryegrass =0, alfalfa =4, Kikuyo =8, maíz =10, papa= 4). Adicionalmente, cada especie requiere un TT para emitir hojas (Filocrón) y llegar a madurez fisiológica (maíz= 1200, Alfalfa =700, rye grass = 330). Adicionalmente la duración de la hoja se expresa en TT. Varios trabajos han mostrado que existe una alta correlación entre los TT, el índice de área foliar y la producción. (Arnold, 1959; Yzarraga *et al* 2007; Gilmore y Rogers, 1958). Este factor es fundamental para estimar la producción, pues en los Andes se siembra todo el año y para el mismo cultivo y productividad se han encontrado los mismos TT pero variaciones hasta del 250 % en el tiempo calendario. (Yzarraga *et al*, 2007).

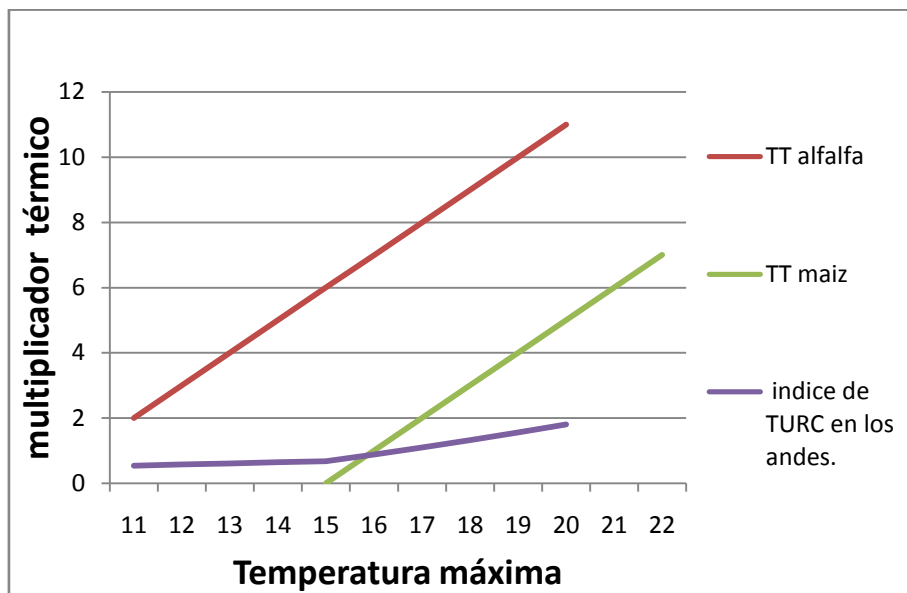
Un ajuste necesario al factor térmico del índice de Turc es considerar los TT de cada uno de los cultivos respectivos. En la figura 1 se presenta el factor multiplicador que se debería utilizar cuando se emplea el índice de Turc y la aproximación de tiempos térmicos. El índice de Turc subestima el impacto de la temperatura en los Andes y no discrimina entre cultivos,



como sí lo hace la modificación propuesta.

Un aspecto importante del TT es que se asimila a la amplitud diurna de temperatura y existen varios trabajos que muestran un alta correlación entre la amplitud diurna y la radiación solar (Schrott, 1994). Sin embargo, esta aproximación presenta una gran variación cuando se estima para los Andes altos que tienen estaciones con radió metros: Huancayo 3308 msnm =0.59, Puno 3820 msnm= 0,44, Chuquibambilla 3971 msnm= 0.48, Cosmos 4575 msnm= 0,71. En la selva tropical estas correlaciones varían entre 0,68 y 0,79. (Baigorria *et al*, 1991). El numero de pastoreos al año se estima con base en los grados días térmicos año divididos por la relación entre la duración de la hoja y el Filocrón.

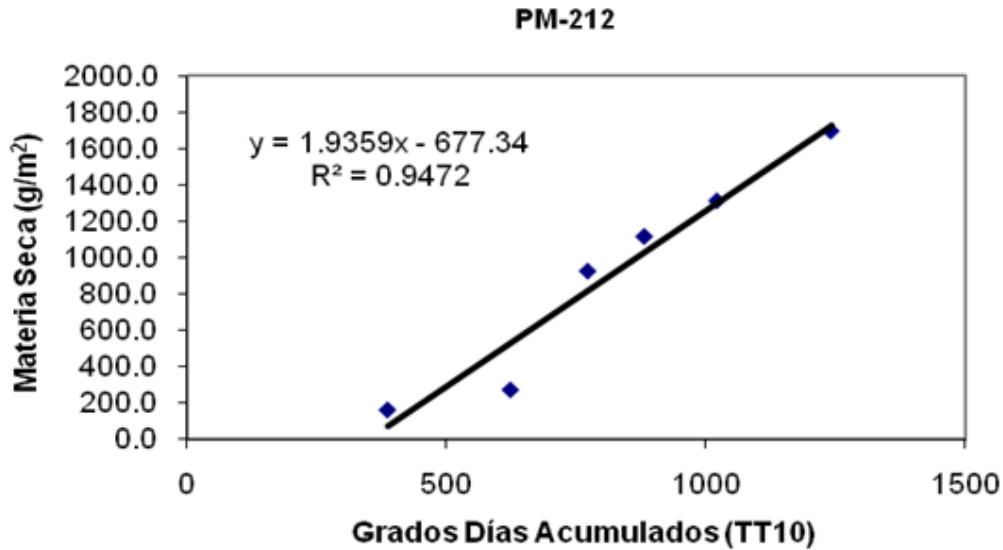
Figura 1. Relación entre el valor del multiplicador térmico del índice de Turc y los TT



Fuente. Cálculos de autor con base en varios datos climáticos.

Con esta metodología, la primera aproximación es estimar la producción de biomasa por especie con base en los TT para llegar a madurez fisiológica. Generalmente se obtiene una regresión lineal entre biomasa aérea y TT, de tal forma que la pendiente es la producción por grado-día acumulado (Figura 2). La cantidad de grano se obtiene multiplicando la producción de biomasa por el índice de cosecha de cada especie. Esta aproximación tiene la ventaja de ser de fácil estimación, presentándose pocas diferencias entre los estimativos mensuales y diarios dado que la temperatura es más estable que la radiación fotosintéticamente activa a través del tiempo.

Figura 2. Relación entre grados días acumulados y la producción de biomasa



Fuente: Yzarraga, 2009

### 3.2. Factor Solar (parámetro R)

En el índice de Turc el factor radiación está estrechamente ligado con las horas luz y la intensidad de radiación que se obtiene por la latitud. El parámetro R viene definido mediante la siguiente expresión:

$$R = R_A \cdot (0,18 + 0,62 \cdot ne / Nm)$$

En donde:

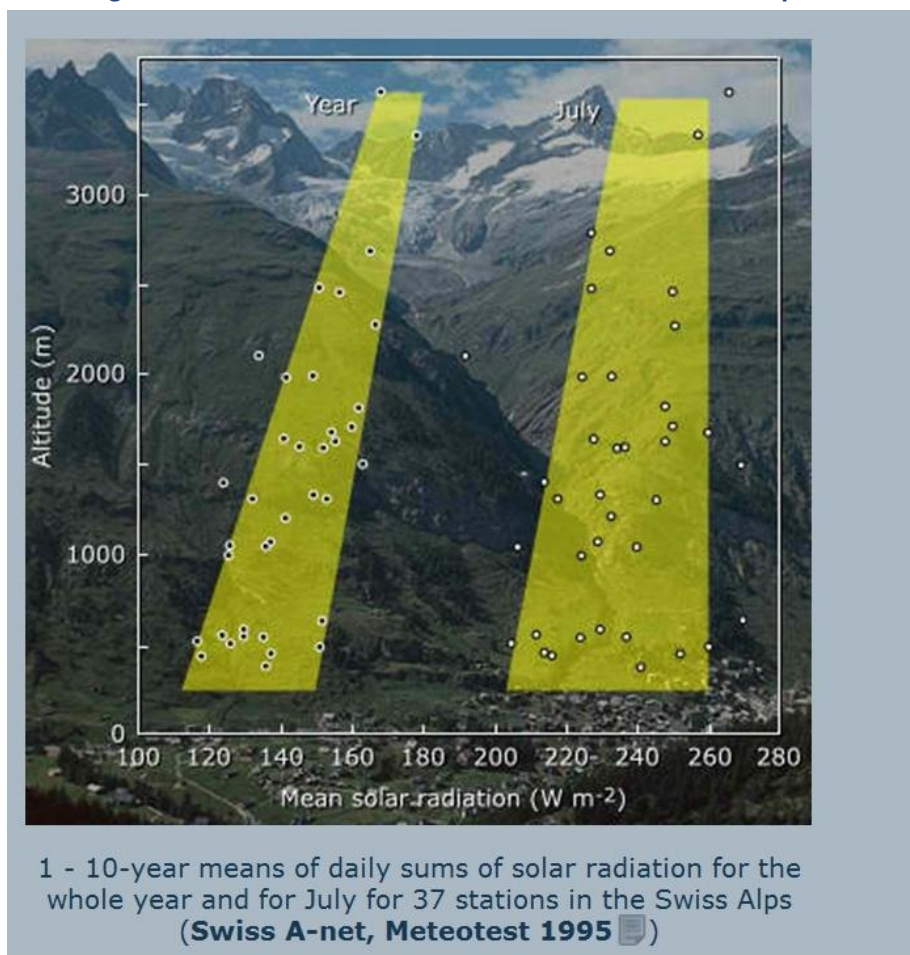
- Nm: horas luz día por latitud norte
- ne: insolación eficaz (horas sol/día)
- $R_A$ : radiación solar global ( $\text{cal}/\text{cm}^2$  día por latitud)

En días despejados el factor R sería muy cercano a la radiación global. Si no hay nubes el valor de  $ne/Nm$  sería muy cercano a 1 y la radiación local sería muy cercana al 80% de la radiación solar global. Lo que dice este factor de multiplicaciones que en los países templados el factor más importante es radiación total, que existe muy poca saturación de radiación en la hoja y que la fotosíntesis diaria se puede estimar fácilmente con base en la radiación interceptada por el área foliar. Esto se presenta así porque la variación por latitud es más importante que la variación por altitud como se puede apreciar en la figura 3.

En los Andes existen varios factores que complicarían esta estimación, pues los factores se modifican con la altura para la misma latitud y se cometerían grandes distorsiones si utilizamos las tablas sugeridas por Turc. En primer lugar la intensidad de la radiación es más alta en los Andes. La radiación en los países templados tiene una intensidad neta máxima al medio día de  $600 \text{ w}/\text{m}^2$ .



Figura 3. Intensidad de la radiación en las montañas europeas



Fuente :Meteotest, 1995. <http://alpandino.org/en/oCurse/02/02b.htm>

Esta intensidad permite que las hojas de los cultivos se saturen pocas veces al día pues la intensidad media está muy cercana a los 350-400 w /m<sup>2</sup>, que coincide con el punto de saturación. En los Andes se tienen menos horas de sol (5 h) que en los países templados (14 h) con una radiación muy variable a través del día que fluctúa entre 80 y 1000 w/m<sup>2</sup>, según la presencia de nubes. (Estrada, 2009).

Por encima de 2600 msnm comienzan a existir cambios en la proporción de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) con respecto a la radiación total. Se tenía la sospecha que a medida que se incrementaba la radiación total, la PAR disminuía y que no correspondía al 50 % de la radiación total como siempre se había aceptado en los Andes. Datos (49.155) detallados con radiación horaria han permitido confirmar que la PAR (entre 2700 msnm y 3200 msnm) cambia con la radiación total y la altura según, la siguiente ecuación:

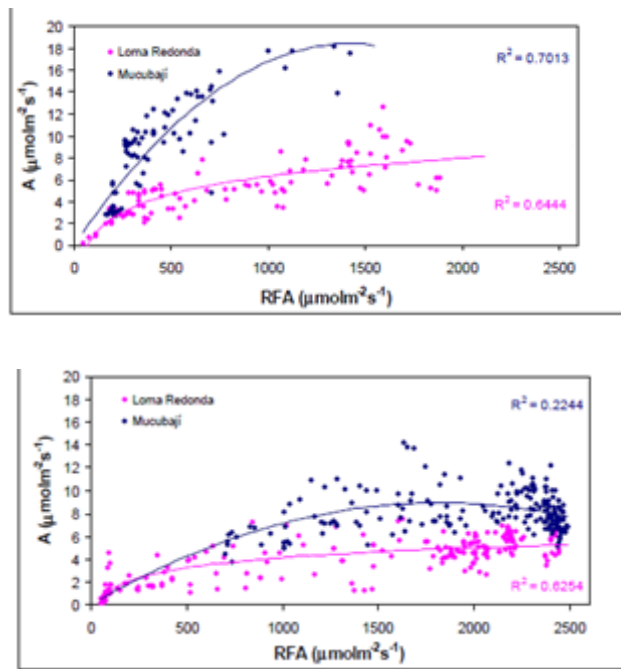


$$PAR = 745 + 3,22 RT - 0,0016 RT^2 - 0,275 A. R^2 = 0,9064$$

Donde PAR es radiación fotosintéticamente activa expresada en micromoles/m<sup>2</sup>/s, RT expresada en vatios y A es la altura expresada en m.s.n.m.

Un estudio realizado en los Andes venezolanos (Colmenares, 2003) mostró que a 3500msnm la radiación PAR alcanza los 1500  $\mu\text{molesm}^{-2}\text{s}^{-1}$  y fotosintétiza hasta 18  $\mu\text{molesm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . A 4100 msnm la radiación PAR se incrementa hasta 2100  $\mu\text{molesm}^{-2}\text{s}^{-1}$  pero solo fotosintética 7  $\mu\text{molesm}^{-2}\text{s}^{-1}$ . En la época seca la radiación aumenta en los dos sitios hasta 2500  $\mu\text{molesm}^{-2}\text{s}^{-1}$  pero la fotosíntesis solo alcanza unos 8  $\mu\text{molesm}^{-2}\text{s}^{-1}$  (Figura 4).

Figura 4. Relación entre la asimilación y la radiación fotosintéticamente activa en Loma Redonda y Mucubají, en la estación húmeda (superior) y la estación seca (inferior)



En esta segunda aproximación se estima la producción de biomasa diaria con base en la interacción entre los TT, el índice de área foliar, la radiación interceptada, la radiación asimilada, la eficiencia fotosintética. En este proceso se utilizan los TT para estimar los días calendario para madurez fisiológica. Para este período se estima la radiación diaria asimilada con base en la saturación de la hoja por radiación y se multiplica por la eficiencia fotosintética en el punto de saturación.

Di Nucci de Bedendo(2009) y Collinoet al(2005) determinaron que la eficiencia en utilización de radiación (EUR),calculada con base en la PAR incidente, crece linealmente con la temperatura con

una pendiente de 0,086 g MJ<sup>-1</sup> por °C de incremento de la temperatura media diaria, hasta valores de 21,3 °C (temperatura crítica) en donde se alcanza la máxima eficiencia de 1,3 g MJ<sup>-1</sup> por radiación incidente, que equivale a 2,6g MJ<sup>-1</sup> de radiación asimilada, para una calidad de biomasa de 26% de proteína. Hay variedades que alcanza una eficiencia de 1,6 g MJ<sup>-1</sup> por radiación incidente.

En términos prácticos, se fija en 1.2 MJ/m<sup>2</sup>/hora la saturación de la hoja, utilizando las horas de luminosidad y estimando en 2.8 g MJ<sup>-1</sup> la eficiencia fotosintética para biomasa área equivalente con contenidos de proteína de 8%. Ésta se corrige por la calidad de la biomasa producida (azúcares, almidones, proteína y aceite), según la aproximación de Andrade (1996). Con esta producción de biomasa se ajusta día a día el índice de área foliar y se estima nuevamente la radiación interceptada.

En la producción de pasturas se considera adicionalmente, la altura del pasto cuando termina el pastoreo y con base en ella se determina el índice de área foliar y la interceptación de la radiación. Experimentos han mostrado que esta puede variar entre 0,18 y 0,90(Brougham,1956) dependiendo de la altura de la pastura cuando termina el pastoreo. El pasto se utiliza en su madurez fisiológica y la producción de biomasa depende de la radiación asimilada en el tiempo calendario necesario para lograr la madurez fisiológica.

### 3.3. Factor sequedad (Fs)

Turc propone una evapotranspiración potencial (ETP) basada en la temperatura y la radiación corregida para zonas áridas, con base en la humedad relativa. Una región con 18°C de temperatura, 400 cal/cm<sup>2</sup>/día y una humedad ambiental mayor al 50 % tendría una evapotraspiración de 69,42 mm mensuales (833 mm año).Según la fórmula propuesta por Turc,

$$ETP = f \cdot (t_m / t_m + 15) \cdot (R + 50) \cdot C$$

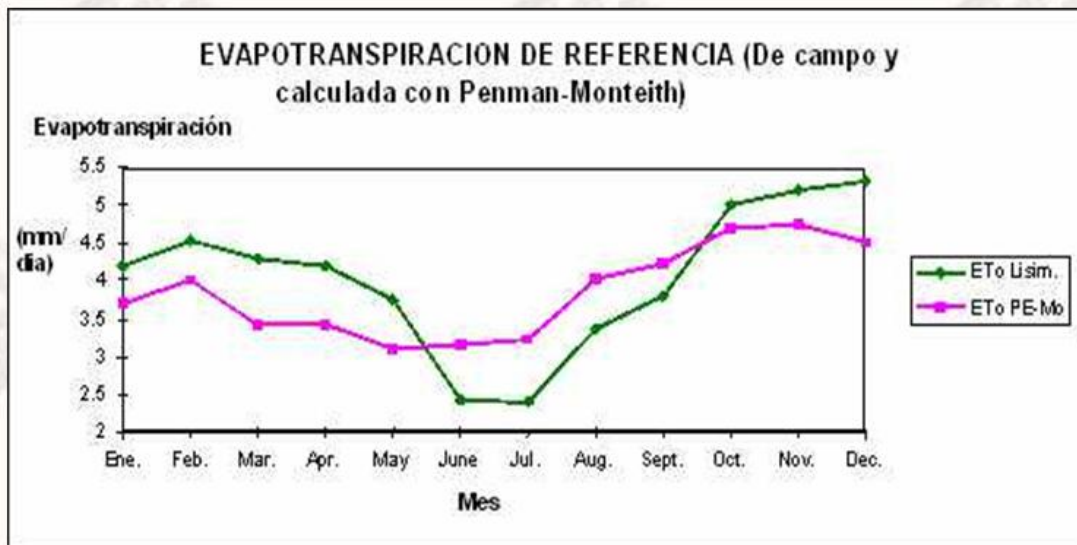
Donde:

- f: factor de corrección mensual, 0,37 para febrero y 0,4 para el resto
- t<sub>m</sub>: temperatura media mensual (°C)
- R: radiación solar media medida en el suelo (/cm<sup>2</sup>-día)
- C: factor de corrección para zonas áridas en función de la humedad relativa (hr): Si Hr>50%, C=1; Si Hr<50, C= [(50 - hr) / 70]



Generalmente las necesidades de riego se miden con respecto a la producción potencial de un pasto de referencia. Debido a la variación anual del clima en los Andes, la evapotranspiración del ryegrass en el lisímetro (figura 5) presenta notables diferencias entre sus valores de lluvia y sequía. La máxima tasa de demanda de agua ocurre durante los meses de máxima radiación solar, la cual ocurre en el mismo periodo que lo hacen las lluvias. Vacher *et al.* (1994) reportan que la reducción en la ET del ryegrass durante la estación de lluvias podría ser atribuida no sólo a la reducida demanda atmosférica y radiación neta sino también a la reducida actividad metabólica del cultivo, debido a la disminución de las temperaturas mínimas. En contraposición, los resultados obtenidos usando la fórmula de Penman-Monteith muestran menor variación mensual que aquellos de los lisímetros. Estos valores relativamente estables aparentemente no presentan relación con la elevada variación térmica y la diferencia en la radiación recibida en la superficie terrestre, entre las épocas de lluvia y sequía.

Figura 5. Evapotranspiración de referencia



Entonces la fórmula de Penman-Monteith aparentemente sobrestima los valores de ETo en la estación de lluvia, cuando la actividad metabólica es baja y subestima dichos valores en la estación seca. El grado de subestimación en el período seco es relativamente alto, alcanzando en algunos casos hasta 1.3 mm/día o 30%, lo cual se convierte en una subestimación mensual de alrededor de 40 mm (Vacher *et al.*, 1994).

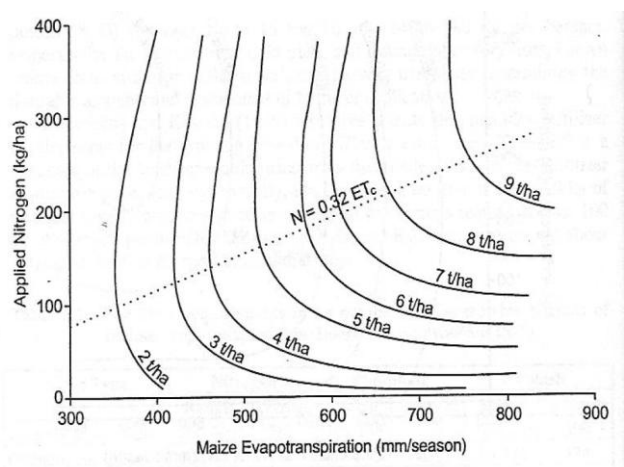
La propuesta de proyecto AN1 es estimar la evapotranspiración potencial diaria con base en la productividad potencial. Esta viene dada por los TT y la radiación, y está de acuerdo con los resultados encontrados a nivel de campo. Con la producción mensual se estima el agua necesaria para realizar este proceso (220 l/kg MS biomasa maíz (Marozzi,2005) 400 l/kg MS alfalfa(Collino,2005),etc.). Para estimar el agua disponible en el suelo se calculan promedios

móviles mensuales de la precipitación diaria y con base en esta disponibilidad se corrige la producción de biomasa y la evapotranspiración. Adicionalmente se estiman las necesidades de riego en  $m^3/ha$ . Esto es posible de hacer en los Andes, pues los aguaceros son pocos intensos y el contenido de materia orgánica (hasta el 30%) permite la retención de agua en el suelo por mucho tiempo.

#### 4. Ajuste por uso de fertilizantes

Con base en la eficiencia de utilización de nitrógeno por el maíz se asume que hay una relación lineal de 0,32 kilos de nitrógeno por cada mm de agua. Por consiguiente, por cada kilo de nitrógeno se estaría produciendo 46 k grano/ha como se observa en la figura 6 (Hargraves and Merkley, 1998). Esta aproximación se utiliza para los demás cereales, ajustándolo según el contenido de proteína en la hoja y grano. En los cultivos de pasturas se estima la utilización de nitrógeno considerando el contenido de proteína en la hoja y asumiendo una eficiencia del 65 % en la utilización del nitrógeno aplicado.

Figura 6. Eficiencia del maíz en la utilización de agua y nitrógeno



#### 5. Ajustes requeridos para estimar adecuadamente la producción de pasturas y la adaptación que pueden aportar los Andes ante el cambio climático

En el diseño de alternativas para producir beneficios que puedan ser compartidos, las pasturas y los cultivos para forraje pueden ser el elemento más interesante. Permiten utilizar más eficientemente la radiación solar y el agua a través del año y son elementos fundamentales en la rotación con el cultivo más frecuente en los Andes: la papa. Adicionalmente, es el mecanismo que utilizan los más pobres para incrementar el contenido de materia orgánica del suelo.

Cuando se analiza la producción de pasturas y el impacto que ésta puede tener en la pobreza generalmente se la subestima. Esto se debe a la mala imagen que tiene, pues se le atribuye ser el motor que ha contribuido a deforestar las selvas tropicales de las partes bajas y altas. Los trabajos no discriminan por especie y generalmente la tratan en forma muy genérica, sin conocer las grandes diferencias que existen entre ellas. Un diseño competitivo de mecanismos para compartir beneficios exige un conocimiento más detallado de los pastos alto-andinos en los siguientes aspectos:

- *Los niveles de erosión*

Existe una gran diferencia en los niveles de erosión que se producen con las diferentes pasturas. El pasto kikuyo es uno de los pastos que más reduce la erosión en los Andes. Estudios realizados en Venezuela demostraron que después del establecimiento (4342 kg /ha de erosión) ésta se reducía drásticamente, presentándose menos de 125 k/ha después del segundo pastoreo. En el mismo experimento la erosión de la papa era 5,5 veces superior, 24675 kg/ha y 15,5 veces cuando se trata de suelo desnudo (69883 k/ha) (Pérez y López, 2000).

En China los programas para detener la erosión entre 2000 y 2600 msnm se hicieron con base en la alfalfa. Se sembraron cerca de 40000 ha y tres años después mostraban entre el 80 -90 % de cobertura (FAO, 2007).

- *Profundidad de raíces y la eficiencia en la utilización del agua*

Las raíces de las pasturas andinas varían entre 0,3 (ryegrass) y 6 (alfalfa) metros de profundidad. Esto les da un comportamiento muy diferente ante las sequías y ante la eficiencia en la utilización del agua del perfil. A los 10 meses, la alfalfa puede absorber toda el agua disponible hasta 2 metros de profundidad; a los 17 meses absorbe toda el agua hasta 2,4 m y de allí en proporciones decrecientes hasta llegar a 5,5 m de profundidad (Collino, 2005). Esto le permite a la alfalfa utilizar el agua disponible en los acuíferos superficiales.

En el caso de estrés hídrico, el ryegrass inhibe la emisión de hojas y la concentra en la elongación de raíces. Sin embargo, estas longitudes rara vez sobrepasan los 30 cm (Restrepo y Escobar, 2007).

La calidad de la biomasa en los Andes puede ser muy diferente (8 a 30 % de proteína). Por lo tanto, la eficiencia en la utilización del agua se debe estimar por kilo de MS pero también por unidad de proteína. Esto permitirá hacer una comparación más justa con los cultivos de las partes bajas que generalmente tienen niveles más bajos de proteína. (4-12 %)

- *El impacto de la temperatura en la duración de la rotación*



Como ya se ha mencionado, la temperatura condiciona los días de rotación y la radiación la formación de índice de área foliar. La interacción de estos dos factores permite rotaciones entre 27 y 70 días de duración. Casi todas las especies necesitan entre 330 y 400 grados días térmicos para llegar a madurez fisiológica. Esto hace que en las partes bajas se logren rotaciones más frecuentes pero con menores niveles de proteína.

- *Resistencia a heladas*

La resistencia a heladas está muy relacionada con el contenido de proteína en la hoja. En general, las pasturas andinas tienen buenos contenidos de proteína y en los Andes éstos se incrementan en un 10 % pues la tasa de crecimiento es menor que en los climas templados. Con estos niveles de proteína se pueden lograr resistencias a heladas de  $-8^{\circ}\text{C}$  en el caso de alfalfa y de  $-4^{\circ}\text{C}$  en ryegrass. El pasto kikuyo es mucho más sensible y no aguanta heladas superiores a  $-2^{\circ}\text{C}$ .

- *El impacto del pastoreo en el índice de área foliar*

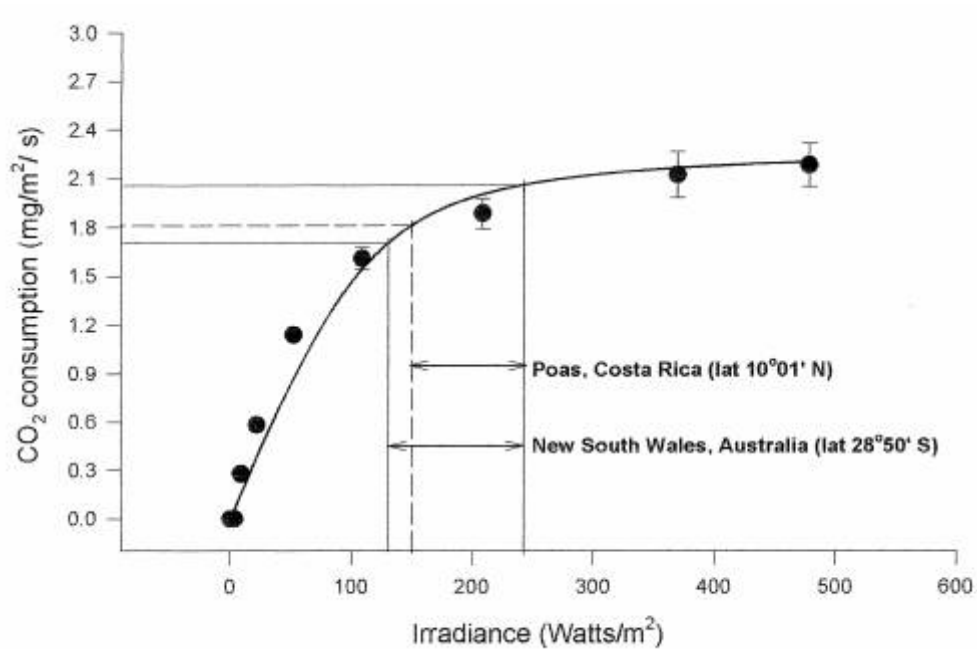
Cada pasto debe ser pastoreado cuando se encuentra cerca de la madurez fisiológica, que se estima por la relación entre la duración de la hoja y el Filocrón. La intensidad de pastoreo debe respetar la acumulación de reservas en la pastura y por lo tanto debe tener una altura mínima después del corte. El más sensible es el ryegrass (12 cm) seguido por la alfalfa (10 cm) y el kikuyo que sí puede ser pastoreado más drásticamente (5 cm).

- *La saturación de la hoja por radiación*

La alfalfa se satura con  $1700 \mu\text{molesm}^{-2}\text{s}^{-1}$  (Collino *et al*, 2005), el ryegrass lo hace con  $1200 \mu\text{molesm}^{-2}\text{s}^{-1}$  (Woledge and Parsons, 1986) y el pasto kikuyo con  $1000 \mu\text{molesm}^{-2}\text{s}^{-1}$  (250 w/m<sup>2</sup>) (Murtagh, 1988) Figura 7. Esto explica también porque el pasto kikuyo se comporta bien en bosques de niebla mientras que la alfalfa y el ryegrass necesitan mayores radiaciones. Smeal *et al*, (1991) han determinado que se requieren  $28 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (como radiación solar incidente sobre el cultivo) para logra los máximos niveles de productividad. Esta radiación rara vez se encontrara en los Andes; por lo tanto, sólo se pueden alcanzar niveles de 20 T/ha/año. Muestra también lo difícil que es mantener alfalfares puros cuando baja la radiación solar sin disminuir sustancialmente la temperatura.

Figura 6. Pasto kikuyo. Saturación de la hoja por radiación y eficiencia fotosintética





- *La posibilidad de producir henos*

En Colombia, las lluvias de la zona andina son bimodales a través del año y esto hace que la producción de biomasa de pasturas sea muy estable a través del año. Los dos o tres meses de sequía que existen no son suficientes para reducir sustancialmente la producción de las pasturas que tienen sistemas radiculares desarrollados. Esto permite utilizar la alfalfa como una pastura de corte de suministro diario al ganado de leche. Esto genera empleos equivalentes a los de la papa sin necesidad de hacer siembras semestrales en forma permanente. El principal problema para el secado es la alta humedad ambiental que obliga a terminar el secado con energía de gas o petróleo, haciendo muy caro todo el proceso.

- *Impacto de la calidad de la pastura en la sustitución de concentrados*

La dificultad para poder hacer henos o ensilajes obliga a utilizar las pasturas todos los días, existiendo un desfase entre la producción de biomasa y la carga animal adecuada para hacer un uso óptimo, en el punto de madurez fisiológica, que corresponde a la época en la cual alcanza la mejor calidad.

Los análisis realizados muestran que la duración de la rotación (30 a 80 días) es muy variable a través del año y entre años, necesitando una carga animal variable para poderla utilizar. La mayoría de las fincas no pueden tener esta carga variable y por lo tanto deben tener animales con alta capacidad de consumo en épocas críticas, lo cual lleva a utilizar el forraje con animales de leche y, en especial, a sustituir el concentrado en los animales menos productivos.



Esto conlleva a que se deba conocer cuál es el contenido de nutrientes a través del ciclo de crecimiento y cómo el contenido de nitrógeno en la hoja afecta la eficiencia fotosintética y la digestibilidad del forraje. Esto tiene gran incidencia en el consumo de agua pues con la especie y/o la fertilizada se incrementa el contenido de proteína en el forraje, requiriéndose el doble de agua que para producir carbohidratos. Este consumo adicional de agua se ve compensado si el forraje es de suficiente calidad, como en el caso de la alfalfa, pues se pueden lograr grandes eficiencias de agua cuando se comparan la sustitución de fuentes proteicas como las tortas de soya y algodón. Adicionalmente, el impacto en pobreza puede ser muy grande pues el alto costo de oportunidad del forraje se logra en la sustitución de las fuentes de proteína en el concentrado.

- *Utilización de fertilizantes*

Existe una gran diferencia en la capacidad de las pasturas alto andinas en la utilización de los fertilizantes. El precio de los fertilizantes ha crecido sustancialmente en los últimos años, pero en especial ha presentado grandes variaciones a través del tiempo. La alfalfa tiene la ventaja de no utilizar fuentes de nitrógeno, compitiendo muy bien con las demás pasturas que requieren una alta proporción de fertilización para llegar a altos contenidos de proteína en la hoja.

## 6. Conclusiones

- La productividad espacial y temporal por hectárea y  $m^3$  son esenciales para diseñar alternativas que ayuden a identificar los beneficios que puedan ser compartidos para contribuir a reducir pobreza. Estos dos elementos permiten evaluar la competitividad, los beneficios privados y sociales y la captura potencial de beneficios por los estratos más pobres.
- La interacción de los tres factores (temperatura, radiación y sequedad) considerados en el índice de Turc, son esenciales para predecir espacial y temporalmente cuáles son los niveles de productividad agropecuaria por hectárea y por  $m^3$  de agua.

Este principio y la metodología se han utilizado con éxito en los cultivos que tienen información precisa de producción que permite comparar las variables climáticas con la productividad.

- El índice de Turc es una herramienta muy útil para predecir la productividad en los países templados del hemisferio norte, para los cuales fue diseñado. Ha funcionado bien y se está utilizando para fijar las primas de seguro por variación climática.
- En los Andes se realizan siembras todo el año y la productividad espacial está muy relacionada con nichos de producción donde se integran temporalmente los tiempos térmicos por especie, la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y la disponibilidad de agua. La PAR está muy relacionada con la presencia de nubes a través del día. Esto impide





que se tengan tablas calibradas de radiación, brillo solar y temperatura como sí ocurre en los países templados: esta información es muy útil para construir índices sencillos. Adicionalmente, impide tener una información muy precisa de producción que permita relacionar los índices con los niveles de productividad.

- El proyecto AN1 y sus socios han realizado un gran esfuerzo para conseguir información de estaciones automatizadas que miden en forma horaria la relación entre la radiación total y la fotosintéticamente activa. Esto ha permitido corregir muchas de las aproximaciones que se tenían sobre la proporción entre estos dos parámetros. En los Andes de Colombia, a medida que se incrementa la radiación total se reduce la PAR llegando a niveles del 30 %. Este cambio es especialmente sensible entre 2600 y 3200 msnm.
- Con base en las consideraciones anteriores, el proyecto AN1 estima la productividad y la eficiencia en la utilización del agua en los Andes a través de los modelos fisiológicos de los cultivos. Esto requiere considerar tiempos térmicos por especie, radiación PAR y utilización del agua con base en productividad por hectárea.
- En los Andes, las pasturas son uno de los componentes más importantes y el que tiene mayor área en uso de la tierra. El manejo de la pastura tiene gran incidencia en la productividad y en la eficiencia del uso del agua, y se puede evaluar rápidamente a través de los modelos fisiológicos.
- Por todos los elementos expuestos, la alfalfa sería el mejor indicador del potencial de producción en los Andes. Trabaja bien con temperaturas críticas, es muy eficiente en la utilización del agua, tiene una buena eficiencia fotosintética y de agua por unidad de proteína, tiene un precio sombra alto en la sustitución de concentrados y, después de la papa, es el que utiliza más jornales por hectárea. Tiene la ventaja que se siembra cada 10 años, controlando en gran medida la erosión, construyendo suelo en los perfiles más arenosos que es donde obtiene los mejores resultados. No utiliza fertilizantes nitrogenados ni en la primera siembra. Los balances hídricos estimados con base en la producción de alfalfa son los mejores indicadores de la evapotranspiración potencial de los demás cultivos y, por ende, una forma rápida de estimar su productividad.



## Bibliografía

Amorox, J. 2001. **Índice de potencialidad agrícola de Turc.** En Miliarium.com. Ingeniería civil y medio ambiente.

Andrade, F.H, A. Cirilo, S. Uhart y M. Otegui. 1996. **Ecofisiología del cultivo de maíz.** Unidad integrada FCA, UNMdP – INTA Balacrce. DekalbPress. Editorial La Barrosa. 292 p.

Arnold, C. Y. 1959. **The Determination and Significance of the Base Temperature in a Linear Heat Unit System.** Proc. Ame. Soc. Hort. Sci., 74: 430-445

Baigorria, G.A. and W.T. Bowen. 2001. **A Process-Based Model for Spatial Interpolation of Extreme Temperatures and Solar Radiation.** In *Methodologies for Interdisciplinary Multiple Scale Perspectives.* Proceedings of the SAAD III Third International Symposium on Systems Approaches for Agricultural Development, Lima, Peru, November 8-10, 1999. (Available on CD-ROM from the International Potato Center.)

Baigorria, G. et al. 2004. **Atmospheric Transmissivity: Distribution and Emperical Estimation Around the Central Andes.** International Journal of climatology. Int. J. Climatology. 24: 1121–1136 (2004)

Brougham, R. W. 1956. **Effect of Intensity of Defoliation on the Regrowth of Pasture.** *Australian Journal of Agricultural Research* 7: 377-387

Collino, D.J.,J. L. Dardanelli, M. J. De Lucaand R.W. Racca. 2005. **Temperature and Water Availability Effects on Radiation and Water Use Efficiencies in Alfalfa (*Medicago sativa* L.).** Aust. J. Exp. Agric. 45:383.

Chapman, D.F. y G. Lemaire. 1993. **Morphogenetic and Structural Determinants of Plant Regrowth after Defoliation.** Proc. XVII Int. Grassl. Congress. p 95-104.

Colmenares, M. 2003. **Estudio del crecimiento de *Polylepissericea Wedd* en el páramo venezolano.** Tesis de grado. Universidad de los Andes .Facultad de ciencias, Departamento de Biología. Instituto de Ciencias Ambientales y Ecológicas ,55p.

Di Nucci de Bedendo E., O. Valentinuz, M. V. Firpo y M. del H. Martínez. 2009. **Análisis de crecimiento de alfalfa en condiciones potenciales.** Paraná. Agrolluvia.com.

Estrada, R.D. 2008. **Modelo estadístico para predecir la producción nacional mensual de frutos y aceite de palma.** Ajustes obtenidos con la información mensual entre 1997 y 2009 y las predicciones mensuales para el año del 2010. FEDEPALMA, 45p.



Estrada, R.D. 2011. **Diseño de mecanismos para compartir beneficios privados y sociales: Estudio de prefactibilidad de la siembra de alfalfa en el Departamento de Nariño.** Documento en proceso.

Gilmore, E. & J. Rogers. 1958. **Heat Units as a Method of Measuring Maturity in Corn.** Agron. J., 50 (5): 611-615.

FAO,2007. **Estudio de caso 6. Desarrollo del heno en China.** En *Forrajes para el mejoramiento ambiental del plateau de loess (control de la erosión y desarrollo por medio de la forestación y las pasturas en el condado de XII, regionautonoma de Ningxia.* [www.fao.org/docrep/007/x7660s/x7660s0k.htm](http://www.fao.org/docrep/007/x7660s/x7660s0k.htm) -

Hargreaves,G.H. and G. P. Merkle. 1998. **Irrigation Fundamentals. An Applied Technology Text for Teaching Irrigation at the Intermediate Level.**182.

Marozzi, D. 2005. **Determinación de algunos indicadores de rendimiento del cultivo de maíz bajo diferentes sistemas de riego.** Universidad Nacional del Nordeste. Comunicaciones Científicas. Resumen A-036 4 p.

Méndez *et al.* 2003. **Relación entre el índice de Turc y el rendimiento de la alfalfa en España peninsular.** Estudios geográficos LXIV,252. 435-453 p.

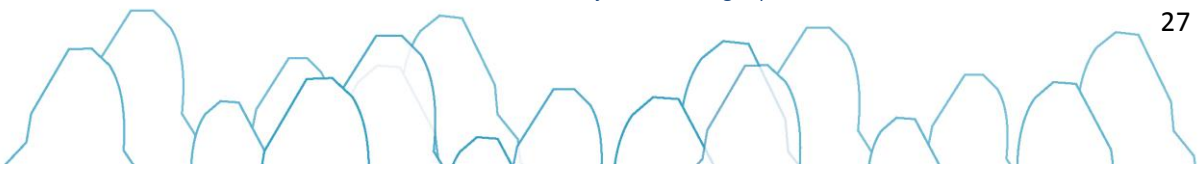
Meteotest.1995. **Dynamic Mountain Climate Solar radiation.**  
<http://alpandino.org/en/oCourse/02/02b.htm>

Murtagh, G. J. 1988. **Factors Affecting the Growth of Kikuyu. I. Potential Growth and Nitrogen Supply.** Crop & pasture Science CSIRO publishing Australian Journal of Agricultural Research 39 (1) 31 – 42.

Oregon Department of Agriculture.1998. **On-Farm Development of A Growing Degree Day Based Management Schedule to Enhance Grass Seed Production and Reduce Potential Environmental Losses of Nitrogen.**Natural ResourcesDivision.

Paytas,M.J. 2000.**Eficiencia de intercepción de la radiación fotosintéticamente activa en algodón con diferentes arreglos espaciales.** EEA INTA Reconquista. Área de Investigación en Producción Agrícola.

Pérez, U. y R. López.2000. **Estudio preliminar de la erosión hídrica en un Inceptisol de los Andes venezolanos bajo uso agrícola.** Rev. Forest. Venez. 44(2) 2000, 11-19



Pezzani, F. 2009. **Fisiología de plantas forrajeras**. Fisiología de cultivos, Modulo de pasturas. Powerpoint.

Restrepo, J., A. F. Escobar. 2007. **Evaluación de algunos parámetros fisiológicos del ryegrass bajo condiciones de estrés hídrico**. Grupo de investigación INCA-CES. Línea de investigación: biotecnología y desarrollo integral de sistemas. 49 p

Smeal, D; Kallsen, C.E. and T.W. Sammis. 1991. **Alfalfa Yield as Related to Transpiration, Growth Stage and Environment**. Irrig. Sci. 12:79-86

Schrott L., 2002. **Hidrología del permafrost de montaña y su relación con la radiación solar. Estudio de una cuenca colectora en agua negra, altos Andes de San Juan (Argentina)**. In Trombotto D et Villalba R., *IANIGLA, 30 Years of Basic and Applied Research on Environmental Sciences*, Mendoza, IANIGLA, p. 83-87.

Vacher J., Imaña E., Canqui E. 1994. **Las características radiativas y la evapotranspiración potencial en el Altiplano boliviano**. Revista de Agricultura. Facultad de Ciencias Agrícolas, Pecuarias, Forestales y Veterinarias. Universidad Mayor de San Simón.

Yzarraga, W. Trebejo, I. and Noriega, V. 2009. **Evaluación de unidades térmicas para el crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz amarillo duro (Zea mays, L.) en la costa central del Perú**. Revista peruana geo-atmosférica RPGA. (1),1-10.

